



**Jorge Raposo Azevedo Comportamento ao fogo de secções transversais de
vigas e pilares em aço inoxidável**



Jorge Raposo Azevedo Comportamento ao fogo de secções transversais de vigas e pilares em aço inoxidável

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, do Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e do Doutor Carlos André Soares Couto, Estagiário de Pós-Doutoramento do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

À minha família

o júri

presidente

Prof. Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues
professora auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Luís Manuel Ribeiro de Mesquita
professor adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança

Prof. Doutor Nuno Filipe Soares Borges Lopes
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimientos

Porque este trabalho não seria possível sem aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação, ficam aqui algumas palavras de agradecimento.

Ao meu orientador, Professor Doutor Nuno Lopes, pelo acompanhamento incessante e partilha de conhecimentos, por toda a ajuda e disponibilidade, pelas críticas construtivas, sugestões apresentadas e por todo o incentivo durante a realização deste trabalho. A ele, um imenso obrigado.

Ao meu co-orientador Prof. Doutor Vila Real pelas importantes sugestões que transmitiu na realização desta dissertação e pela sua disponibilidade manifestada.

Ao meu co-orientador Doutor Carlos Couto pelo auxílio prestado, pelas sugestões apresentadas e por todo o acompanhamento ao longo deste trabalho.

Um agradecimento especial à minha família por todo o apoio transmitido e pela oportunidade de poder concretizar esta etapa na minha vida. A todos os meus amigos pelos momentos bem passados. À Bárbara por todo o carinho e incentivo ao longo de todo este trajeto.

A todos, um muito obrigado.

palavras-chave

Aço inoxidável, Classe 4, comportamento ao fogo, compressão, encurvadura local, Eurocódigos, fleccão composta com compressão, momento fletor, pilar, secções transversais, viga.

resumo

A presente dissertação resulta de um trabalho de investigação, cujo principal objetivo é o aumento de conhecimento relativo ao comportamento estrutural do aço inoxidável na construção.

O aço inoxidável assume-se como um material estrutural extremamente vantajoso e proficiente, destacando-se pelo seu caracter durável, resistência à corrosão e fácil manutenção. Apesar do elevado investimento inicial que acarreta, este é normalmente recuperado a longo-prazo devido à sua elevada durabilidade, permitindo ainda abdicar do uso de materiais de proteção térmica.

Nas vigas e colunas em aço inoxidável com secção transversal de Classe 4, a consideração da possibilidade de ocorrência de fenómenos de encurvadura local é muito importante, já que estes fenómenos são agravados na presença de elevadas temperaturas.

O principal objetivo desta dissertação foca-se na realização de um estudo numérico do comportamento ao fogo de vigas e colunas com secções transversais em “I” e “H” de aço inoxidável quando submetidas a altas temperaturas e sujeitas a esforços de compressão e flexão.

Este estudo numérico é efetuado com recurso a elementos finitos de casca com o auxílio do programa de elementos finitos SAFIR com o objetivo de calcular a resistência de placas e perfis em aço inoxidável sujeitos a altas temperaturas.

Por fim, esses resultados numéricos são comparados com a metodologia utilizada pelo Eurocódigo 3 bem como com outras propostas.

keywords

Stainless steel, Class 4, fire behaviour, compression, local buckling, Eurocodes, combined bending and compression, bending, column, cross sections, beam.

abstract

The present thesis is the result of a research work which the main objective is the increase of knowledge on the structural behavior of stainless steel in construction.

Stainless steel is assumed as structural material extremely useful and proficient, being emphasized to its high durability, resistance to corrosion and constructive efficiency. Despite having a high initial cost, this investment is usually reimbursed at long-term due to its high durability, allowing the absence of thermal protection materials.

In stainless steel beams and columns with Class 4 cross-section, it is very important to consider the possibility of occurrence of local buckling phenomena, as these phenomena are aggravated in the presence of high temperatures.

The main objective of this dissertation is to perform a numerical study of the fire behavior of beams and columns with cross-sections in "I" and "H" of stainless steel when submitted to high temperatures and submitted to compression and bending stresses.

This numerical study is performed based on numerical investigation with shell finite elements carried out with the software SAFIR with the objective of calculating the resistance of plates and cross-sections in stainless steel submitted to high temperatures.

Finally, these numerical results are compared with the Eurocode methodology and with other proposals as well.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xix
ÍNDICE DE TABELAS	xxiii
NOMENCLATURA.....	xxv
LISTA DE ACRÓNIMOS	xxvii
1. INTRODUÇÃO	3
1.1. Considerações Gerais.....	3
1.2. Âmbito e Objetivos	4
1.3. Aplicações estruturais do aço inoxidável.....	4
1.4. Estrutura da Dissertação	5
2. CARACTERÍSTICAS MATERIAIS DO AÇO INOXIDÁVEL	9
2.1. Considerações gerais.....	9
2.2. Comportamento Mecânico do Aço Inoxidável	11
3. CÁLCULO ESTRUTURAL DE VIGAS E PILARES EM AÇO INOXIDÁVEL .	19
3.1. Considerações gerais.....	19
3.2. Encurvadura Local	19
3.3. Classificação das secções.....	21
3.4. Resistência da secção de elementos em “I” à temperatura normal de acordo com o EC3	25
3.5. Resistência da secção em situação de incêndio de acordo com o EC3.....	29
3.5.1. Aço carbono.....	29
3.5.2. Aço inoxidável.....	30
3.6. Proposta de (Couto et al, 2013) para secções de Classe 4 em aço carbono.....	30
4. COMPORTAMENTO DE PLACAS.....	35
4.1. Considerações gerais.....	35

4.2.	Considerações para a deformação local a elevadas temperaturas.....	36
4.3.	Estudo numérico de placas.....	37
4.3.1.	O programa SAFIR.....	37
4.3.2.	Modelo numérico.....	37
4.4.	Resultados a temperatura normal.....	38
4.4.1.	Elementos sujeitos a compressão	38
4.4.2.	Elementos sujeitos a flexão	40
4.5.	Resultados a elevada temperatura.....	42
4.5.1.	Elementos sujeitos a compressão	42
4.5.2.	Elementos sujeitos a flexão	47
4.6.	Proposta de Couto et al	50
5.	RESISTÊNCIA DE SECÇÕES TRANSVERSAIS.....	59
5.1.	Considerações gerais.....	59
5.2.	Disposições de dimensionamento para a resistência das secções transversais esbeltas segundo o Eurocódigo 3.....	60
5.3.	Modelo numérico	61
5.4.	Secções transversais estudadas	63
5.5.	Resultados numéricos e comparação com o EC3	64
5.5.1.	Elementos sujeitos a compressão	64
5.5.2.	Elementos sujeitos a flexão	66
5.6.	Proposta de Couto et al	69
5.6.1.	Elementos sujeitos a compressão	69
5.6.2.	Elementos sujeitos a flexão	69
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
6.1.	Conclusões	73
6.2.	Desenvolvimentos futuros	74

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
----------------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ponte Helix, Singapura (fotos: Nicole Kinsman)	5
Figura 2 - Tipos de aço inoxidável de acordo com a sua estrutura metalúrgica (ESDEP, 2000).....	9
Figura 3 - Curva experimental típica para aços inoxidáveis e aço carbono em condições de temperatura normal (adaptado de Euro Inox, 2006).....	12
Figura 4 - Comparação do $k_{E,\theta}$ entre o aço inoxidável e o aço carbono (CEN, 2005b).....	14
Figura 5 - Fatores de redução da tensão de cedência a altas temperaturas (Lopes e Vila Real, 2013; CEN, 2005b).	14
Figura 6 - Comparação da relação tensão-extensão para o aço carbono S235 e o aço inoxidável 1.4301: a) 20°C (adaptado de Lopes, 2009; CEN, 2005b); b) 600°C (Lopes, 2009; CEN, 2005b).....	15
Figura 7 - Encurvadura de placa comprimida axialmente (Vila Real, 2010)	20
Figura 8 - Conceito de largura efetiva (Simões da Silva, 2007).....	21
Figura 9 - Redução do fator para determinar a classe da secção transversal a elevadas temperaturas (adaptado de Lopes, 2009).	24
Figura 10 - Curvas para diferentes classificações da secção transversal.....	25
Figura 11 - Secção transversal de Classe 4 submetida a momento fletor.....	27
Figura 12 - Exemplo do modelo numérico usado para calcular a resistência última de uma placa.....	38
Figura 13 - Carga última de placas para elementos salientes a) e internos b) sujeitos a compressão à temperatura normal.	39
Figura 14 - Forma da deformada de placas sujeitas a compressão em situação de colapso.	40
Figura 15 - Carga última de placas sujeitas a flexão à temperatura normal.....	40

Figura 16 - Forma da deformada de uma placa sujeita a flexão em situação de colapso....	41
Figura 17 – Carga última de placas de elementos internos a) e elementos salientes b) sujeitas a compressão a uma temperatura de 350°C.	43
Figura 18 - Carga última de placas de elementos internos a) e elementos salientes b) sujeitas a compressão a uma temperatura de 450°C.	44
Figura 19 - Carga última de placas de elementos internos a) e elementos salientes b) sujeitas a compressão a uma temperatura de 550°C.	45
Figura 20 - Carga última de placas de elementos internos a) e elementos salientes b) sujeitas a compressão a uma temperatura de 650°C.	46
Figura 21 – Carga última de placas sujeitas a esforço de flexão a uma temperatura de 350°C.	47
Figura 22 - Carga última de placas sujeitas a esforço de flexão a uma temperatura de 450°C.	48
Figura 23 - Carga última de placas sujeitas a esforço de flexão a uma temperatura de 550°C.	48
Figura 24 - Carga última de placas sujeitas a esforço de flexão a uma temperatura de 650°C.	49
Figura 25 - Carga última de placas de elementos internos a) e salientes b) sujeitos a compressão a 350°C.....	50
Figura 26 - Carga última de placas de elementos internos a) e salientes b) sujeitos a compressão a 450°C.....	51
Figura 27 - Carga última de placas de elementos internos a) e salientes b) sujeitos a compressão a 550°C.....	52
Figura 28 - Carga última de placas de elementos internos a) e salientes b) sujeitos a compressão a 650°C.....	53
Figura 29 - Carga última de placas (elementos internos) sujeitos a flexão a 350°C.	53

Figura 30 - Carga última de placas (elementos internos) sujeitos a flexão a 450°C.	54
Figura 31 - Carga última de placas (elementos internos) sujeitos a flexão a 550°C.	54
Figura 32 - Carga última de placas (elementos internos) sujeitos a flexão a 650°C.	55
Figura 33 - Exemplo da deformada de uma coluna sujeita a altas temperaturas na Universidade de Liège (FIDESC4, 2014).....	60
Figura 34 - Deformação local e global de uma viga-coluna testada a elevadas temperaturas num estudo efetuado na Universidade de Liège (FIDESC4, 2014).	61
Figura 35 - Ilustração do modelo numérico, Couto (2015).	62
Figura 36 - Modelação das cargas, Couto (2015).....	62
Figura 37 - Resistência das secções transversais sujeitas a esforço de compressão a temperatura normal a) e a elevadas temperaturas b).	65
Figura 38 - Forma da deformada (x5) durante o colapso de uma secção transversal de Classe 3 sujeita a compressão a uma temperatura 350°C.	66
Figura 39 - Forma da deformada (x5) durante o colapso de uma secção transversal de Classe 4 sujeita a compressão a uma temperatura 350°C.	66
Figura 40 - Resistência das secções transversais sujeitas a esforço de flexão a temperatura normal a) e a elevadas temperaturas b).	67
Figura 41 - Forma da deformada (x5) durante o colapso de uma secção transversal de Classe 3 sujeita a flexão a uma temperatura de 350°C.	68
Figura 42 - Forma da deformada (x5) durante o colapso de uma secção transversal de Classe 4 sujeita a flexão a uma temperatura de 350°C.	68
Figura 43 - Resistência das secções transversais sujeitas a esforço de compressão a elevadas temperaturas.....	69
Figura 44 - Resistência das secções transversais sujeitas a esforço de flexão a elevadas temperaturas.....	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos comuns de aço inoxidável com as classes correspondentes (CEN, 2005c)	10
Tabela 2 - Aplicação em função das necessidades de resistência à corrosão (CEN, 2005c)	11
Tabela 3 - Valores nominais da tensão de cedência f_y , tensão última f_u e modulo de elasticidade, E , para aço inoxidável estrutural (adaptado da CEN, 2006a).....	12
Tabela 4 - Comparação das propriedades dos aços S235 e 1.4301 à temperatura ambiente	13
Tabela 5 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (Alma) (EN 1993-1-1, 2010 & EN1993-1-4, 2006).....	22
Tabela 6 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (banzos) para aço carbono (EN 1993-1-1, 2010)	23
Tabela 7 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (banzos) para aço inoxidável (CEN, 2006a).....	23
Tabela 8 - Fator de redução para os dois tipos de aço.	27
Tabela 9 - Elementos internos comprimidos (almas) (EN1993-1-1, 2006)	28
Tabela 10 - Elementos salientes comprimidos (banzos) (EN 1993-1-5, 2006).....	29
Tabela 11 - Coeficientes a ser usados a uma temperatura conservativa de $\theta_a = 700^\circ\text{C}$	31
Tabela 12 - Dimensões em milímetros e classe dos perfis a estudar à compressão.	63
Tabela 13 - Dimensões em milímetros e classe dos perfis a estudar à flexão.	64

NOMENCLATURA

Letras maiúsculas latinas

A	área da secção transversal;
A_{eff}	área efetiva da secção transversal;
E	módulo de elasticidade longitudinal do aço;
I_{eff}	momento de inércia efetivo;
$K_{E,\theta}$	Fator de redução do modulo de elasticidade;
$M_{c,Rd}$	valor de cálculo do momento flector resistente de uma secção transversal;
M_{Rd}	valor de cálculo do momento flector resistente da secção transversal;
$M_{fi,\theta,Rd}$	valor de cálculo do momento flector resistente para uma distribuição de temperatura ao longo da secção transversal;
$M_{pl,Rd}$	resistência à deformação plástica;
$M_{el,Rd}$	resistência à deformação elástica;
$M_{eff,Rd}$	resistência à deformação efetiva;
$N_{c,Rd}$	valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão de uma secção transversal;
$N_{fi,Rd}$	valor de cálculo do esforço axial resistente para uma distribuição de temperatura ao longo da secção transversal;
W_{el}	Módulo de flexão elástico de uma secção transversal;
W_{pl}	Módulo de flexão plástico de uma secção transversal;
W_{eff}	módulo de flexão efetiva;

Letras minúsculas latinas

b_{eff}	largura da secção transversal efetiva;
f_y	tensão de cedência do aço a 20°C;
f_u	tensão última do aço;
$f_{y,\theta}$	tensão de cedência efetiva do aço a temperaturas elevadas;
$f_{0,2p,\theta}$	tensão limite convencional de proporcionalidade, referida à tensão de cedência a 20°C;
$k_{0,2p,\theta}$	fator de redução para o valor de cálculo da tensão de cedência de secções de Classe 4;
$k_{2,\theta}$	fator de redução da tensão de cedência do aço à temperatura atingida no instante t ;
$K_{E,\theta}$	fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θa atingida no instante t ;
$k_{y,\theta}$	fator de redução da tensão de cedência do aço à temperatura atingida no instante t ;

v_s	distância desde o centro de gravidade da secção transversal até ao banzo superior;
v_i	distância desde o centro de gravidade da secção transversal até ao banzo inferior;

Caracteres do alfabeto grego

ε	extensão, fator que depende de f_y ;
σ	tensão;
ρ	coeficiente de redução;
ρ_θ	coeficiente de redução a elevadas temperaturas;
λ_p	esbelteza normalizada à temperatura ambiente;
$\lambda_{p,\theta}$	esbelteza normalizada em situação de incêndio;
σ_{Cr}	tensão crítica de encurvadura local;
$\sigma_{Cr,\theta}$	tensão crítica de encurvadura local em situação de incêndio;

LISTA DE ACRÓNIMOS

CEN	Comité Europeu de Normalização
EN	Norma Europeia
EC3	Eurocódigo 3
EN 1993-1-1	Parte 1-1 do Eurocódigo 3
EN 1993-1-2	Parte 1-2 do Eurocódigo 3
EN 1993-1-4	Parte 1-4 do Eurocódigo 3
EN 1993-1-5	Parte 1-5 do Eurocódigo 3
SAFIR	Safety Fire Resistance

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais

Nos últimos anos, a aplicação do aço inoxidável para fins estruturais e de construção tem se tornado cada vez mais frequente (Gardner, 2005). Este crescimento deve-se essencialmente ao seu carácter durável, excelência estética, resistência à corrosão e principalmente à sua fácil manutenção (Estrada *et al*, 2007). Porém, o conhecimento científico à volta do comportamento deste material é ainda superficial (Gardner, 2005). Um dos principais aspetos a ter em consideração no estudo do desempenho de estruturas em aço inoxidável é o seu comportamento em situação de incêndio, uma vez que, quando sujeito a elevadas temperaturas apresenta uma grande instabilidade, que se traduz por um comportamento mecânico não linear. A sua elevada condutibilidade térmica permite uma rápida propagação da temperatura, resultando na degradação das suas principais propriedades mecânicas. Esta característica deve ser tida em conta na análise à resistência ao fogo das secções transversais de elementos estruturais.

Em comparação com o aço de utilização tradicional (aço carbono), o tempo de resistência ao fogo do aço inoxidável pode, em algumas situações e recorrendo a análises de cálculo avançadas, ser três vezes superior, podendo-se abdicar do uso de materiais de proteção contra incêndio (Vila Real *et al*, 2005). No que concerne ao investimento inicial exigido, este apesar de ser superior (aproximadamente quatro vezes mais para o aço 1.4301), é compensado numa perspetiva a longo prazo devido à sua elevada durabilidade e ao seu baixo custo de ciclo de vida, contribuindo para uma construção mais sustentável (Euro Inox, 2006).

Alguns estudos têm sido desenvolvidos sobre estruturas de aço inoxidável resultando em novas propostas de cálculo, como por exemplo Euro Inox (2006) e Ng e Gardner (2007). Na Universidade de Aveiro o tema foi também abordado por Lopes *et al* e Couto *et al* (2015), tendo incidido o seu estudo na verificação da resistência ao fogo de elementos metálicos em aço do tipo carbono.

Para a análise da resistência do aço inoxidável é utilizada a Parte 1-4 do Eurocódigo 3, EN 1993-1-4 (CEN, 2006a), referente às regras de cálculo estrutural para elementos estruturais em aço inoxidável à temperatura normal. Para a resistência ao fogo, esta parte remete para a

Parte 1-2 do mesmo Eurocódigo, EN 1993-1-2 (CEN, 2005b), onde é descrito que elementos estruturais feitos de aço inoxidável devem ser verificados usando as mesmas fórmulas desenvolvidas para secções em “I” de aço carbono. Ainda assim, estes dois materiais têm diferentes leis constitutivas em situação de incêndio (assim como à temperatura normal), descritas no Anexo C da EN 1993-1-2 (CEN, 2005b), o que leva a prever a necessidade de estudos no âmbito da avaliação da resistência ao fogo de estruturas em aço inoxidável ao fogo.

1.2. Âmbito e Objetivos

O uso de elementos estruturais em aço inoxidável tem sido extremamente impulsionado pela sua aparência estética, estando vulgarmente associado ao conceito de soluções leves. O seu elevado preço inicial tem feito com que o seu uso se limite a projetos de elevado impacto e valor arquitetónico. No entanto, a procura por soluções tendo por base a utilização do aço inoxidável tem vindo a crescer, essencialmente por causa da sua resistência à corrosão e ao fogo.

Esta dissertação tem como objetivo a realização de um estudo numérico sobre o comportamento ao fogo de secções transversais de elementos estruturais (vigas e pilares) em aço inoxidável do tipo 1.4301, usando como principal ferramenta o programa de cálculo SAFIR. Os principais resultados das simulações numéricas são comparados e discutidos com base na metodologia prevista pelo Eurocódigo 3 e outras propostas. A análise numérica não linear terá em consideração imperfeições geométricas locais.

1.3. Aplicações estruturais do aço inoxidável

Devido ao elevado investimento inicial do aço inoxidável, não é comum o uso deste tipo de material em estruturas mais correntes, no entanto existem atualmente alguns exemplos de habitações concebidas com este material. Com uma maior regularidade tem sido aplicado em espaços públicos, pontes e reabilitação, aproveitando as vantagens que este material tem relativamente ao aço carbono.

Um exemplo de uma destas aplicações é a ponte pedestre Helix, na Marina Bay em Singapura. Concluída e aberta ao público em abril de 2010, foi construída usando 650 toneladas de aço inoxidável duplex cujas características, algumas já mencionadas

anteriormente, permitem esperar um excelente desempenho a longo prazo mesmo estando inserido num ambiente agressivo para o aço comum.

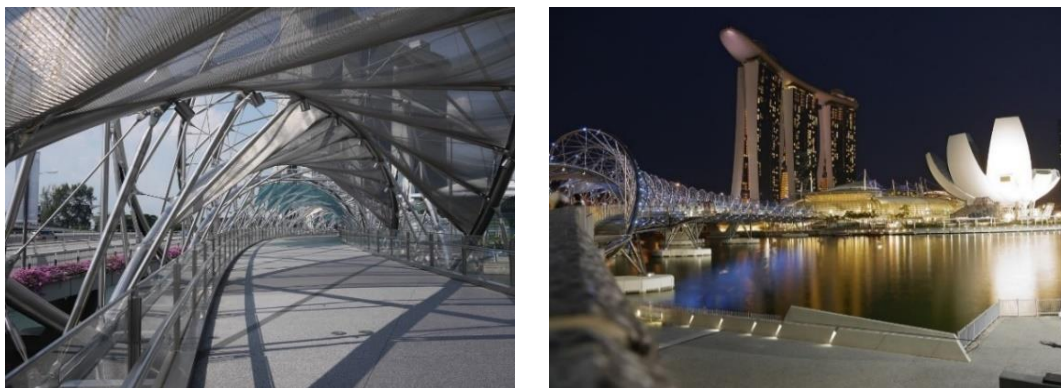


Figura 1 - Ponte Helix, Singapura (fotos: Nicole Kinsman)

1.4. Estrutura da Dissertação

O principal foco deste trabalho incide sobre o estudo do comportamento de secções transversais de vigas e pilares em aço inoxidável em situação de incêndio, através do desenvolvimento de um estudo numérico paramétrico com recurso ao software SAFIR. Após uma breve contextualização, no capítulo 2 apresenta-se uma pequena descrição do material em estudo, com base na sua classificação e comportamento mecânico.

Em seguida, no capítulo 3 são descritas as regras de cálculo do Eurocódigo 3 para classificação das secções e resistência do aço à temperatura normal e em situação de incêndio. Complementarmente são abordadas propostas recentes apresentadas por diferentes autores para o cálculo da resistência da secção em situação de incêndio.

No capítulo 4 apresenta-se o estudo paramétrico desenvolvido com o programa SAFIR, analisando-se a resistência em estado último de placas em aço inoxidável com diferentes cargas e a elevadas temperaturas. Neste capítulo, são feitas comparações entre os resultados obtidos e as fórmulas existentes que salientam a necessidade de se criar novas expressões para o dimensionamento de elementos em aço sujeito a elevadas temperaturas.

O capítulo 5, dedica-se a um estudo paramétrico por forma a determinar e comparar a resistência de várias secções transversais sujeitas a esforços de compressão e flexão.

Por fim, as principais conclusões deste trabalho, bem como algumas propostas de desenvolvimentos futuros são apresentadas no capítulo 6.

Capítulo 2

2. CARACTERÍSTICAS MATERIAIS DO AÇO INOXIDÁVEL

2.1. Considerações gerais

Existem cinco grupos de aço inoxidável, classificados de acordo com a sua estrutura metalúrgica: austenítico, ferrítico, martensítico, duplex (austenítico-ferrítico) e os endurecidos por precipitação (Figura 2). Nem todos eles são adequados para uso estrutural, particularmente quando estão contempladas ligações soldadas. Os austeníticos e os duplex são os mais úteis para aplicações estruturais (Euro Inox, 2006).

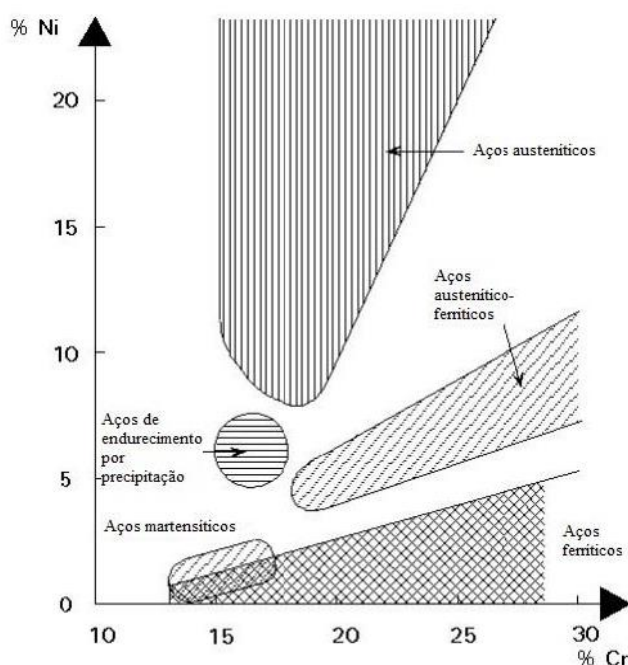


Figura 2 - Tipos de aço inoxidável de acordo com a sua estrutura metalúrgica (ESDEP, 2000).

A diferença entre estes tipos de aço reside na sua composição química, onde a percentagem de níquel é preponderante relativamente aos restantes compostos presentes no aço. Tipicamente as percentagens de níquel variam entre os 8 a 13% e refletem-se no preço final do aço (Lopes, 2009). O ferrítico apresenta a vantagem de ter na sua composição química menos percentagem de níquel, o que diminui o seu custo inicial, mantendo a sua boa resistência à corrosão assim como a sua resistência estrutural. Já os aços do grupo austenítico são aqueles que apresentam maior percentagem, sendo também os que apresentam uma ductilidade superior, permitindo que possa absorver grandes impactos sem fraturar.

(Gamelas, 2014). O duplex apresenta uma elevada resistência às cargas e uma boa resistência à corrosão e ao desgaste. Embora o austenítico seja vulgarmente mais utilizado, tem havido um aumento na procura dos outros dois tipos.

Dentro dos grupos anteriormente descritos podemos classificar o aço inoxidável segundo diferentes tipologias, sendo as mais utilizadas as referentes ao grupo dos aços austeníticos, designados por 1.4301 (ou 304) e 1.4401 (ou 316).

A parte EN 1993 1-4 apresenta alguns dos tipos de aço inoxidáveis existentes de acordo com a EN 10088-2 (CEN, 2005c):

Tabela 1 - Tipos comuns de aço inoxidável com as classes correspondentes (CEN, 2005c)

Ferríticos	1.4003, 1.4016, 1.4512
Austeníticos	1.4306, 1.4307, 1.4541, 1.4301, 1.4401, 1.4404, 1.4539, 1.4571, 1.4432, 1.4435, 1.4311, 1.4406, 1.4439, 1.4529, 1.4547, 1.4318
Austeníticos-ferríticos	1.4362, 1.4462

Como o aço inoxidável tem características que o torna resistente à corrosão quando sujeito a ambientes mais agressivos (Palacios, 2005), é então possível que seja utilizado em estruturas localizadas à beira mar, instalações nucleares, químicas, petrolíferas e de águas residuais. Esta resistência resulta do facto de este material conter na sua base uma camada superficial de óxido, rica em crómio, que se forma espontaneamente na presença de oxigénio, ou seja, quando é danificada (riscada ou cortada) se regenera.

De acordo com a mesma norma, estes aços inoxidáveis podem ser também classificados conforme as necessidades de resistência à corrosão. A Tabela 2 é utilizada como auxílio aos projetistas de forma a, dependendo da localização do elemento e do ambiente a que está sujeito, utilizar a classe de aço mais adequada.

Tabela 2 - Aplicação em função das necessidades de resistência à corrosão (CEN, 2005c)

Classe do aço inoxidável	Rural			Urbana			Industrial			Marinha		
	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A
1.4003	V1	X	X	V1	X	X	X	X	X	X	X	X
1.4301	V	V	V	V	V	(V)	(V)	(V)	X	V	(V)	X
1.4401; 1.4404; 1.4571	O	O	O	O	V	V	V	V	(V)	V	V	(V)
1.4462	O	O	O	O	O	O	O	O	V	O	O	V

Sendo que:

B - ambiente pouco corrosivo;

M - ambiente medianamente corrosivo;

A - ambiente altamente corrosivo;

O - excessivamente corrosivo;

V - indicado;

(V) - indicado se tomadas precauções;

V1 - indicado em apenas aplicações interiores;

X - sofrerá corrosão excessiva.

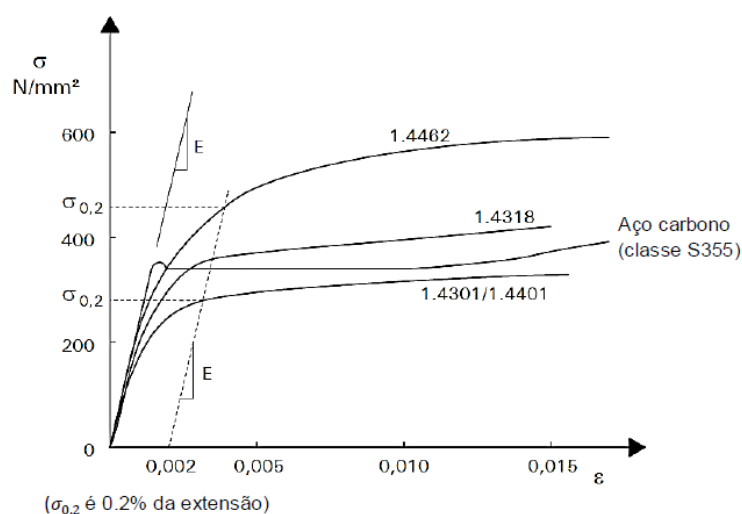
2.2. Comportamento Mecânico do Aço Inoxidável

Para os diferentes tipos de aço inoxidável, os valores característicos da tensão de cedência f_y , da tensão última f_u e do módulo de elasticidade, E , à temperatura normal, encontram-se indicados na Parte 1-4 do EC3 (CEN, 2006a) e são sumariamente apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores nominais da tensão de cedência f_y , tensão última f_u e módulo de elasticidade, E , para aço inoxidável estrutural (adaptado da CEN, 2006a).

Tipo	Classe	Tensão de cedência f_y (MPa)		Tensão última de cedência f_u (MPa)		Módulo de elasticidade E (GPa)
		$t \leq 12$ mm	$t \leq 75$ mm	$t \leq 12$ mm	$t \leq 75$ mm	
Ferrítico	1.4003	280	250	450		220
	1.4301		210	520		200
Austenítico	1.4401	220		530	520	200
	1.4404	220		530	520	200
	1.4571	220		540	520	200
Austenítico-ferrítico	1.4462	460		600	640	200

As ligas de aço inoxidável são caracterizadas pela sua relação tensão-extensão não linear com uma zona de tensão linear curta seguindo-se um endurecimento, contrariamente ao aço carbono (Lopes, 2009). Para o aço inoxidável não existe uma tensão de cedência bem definida pelo que geralmente é usado o valor correspondente a uma deformação residual de 0.2% (limite convencional de elasticidade) (Figura 3) (Lopes, 2009).

**Figura 3 - Curva experimental típica para aços inoxidáveis e aço carbono em condições de temperatura normal (adaptado de Euro Inox, 2006).**

Na Tabela 4 são comparadas as características mecânicas do aço inoxidável 1.4301 com as do aço de carbono S235 (CEN, 2005a, 2006a).

Tabela 4 - Comparação das propriedades dos aços S235 e 1.4301 à temperatura ambiente

Propriedades mecânicas	Aço Carbono	Aço inoxidável
	S235	1.4301
Tensão de rotura f_u (MPa)	360	520
Tensão convencional de cedência f_y (MPa)	235	210
Extensão após rotura	>15%	40%

Como referido anteriormente, a EN 1993-1-4 (CEN, 2006a) menciona apenas a resistência de elementos em aço inoxidável referindo-se à Parte 1-2 do EC3 (CEN, 2005b) quando se tratam de altas temperaturas. Numa situação de incêndio, devido à sua natureza accidental, são aceitáveis deformações mais elevadas do que aquelas consideradas à temperatura normal, assim, para o cálculo da resistência mecânica a altas temperaturas, a EN 1993-1-2 sugere o uso de 2% da extensão total como a tensão de cedência a elevadas temperaturas θ_a , sendo $f_{y,\theta} = f_{2\%,\theta}$ para secções de classe 1, 2 e 3 e $f_{y,\theta} = f_{0,2p,\theta}$ para secções de Classe 4 (Anexo E da EN 1993-1-2).

Quando sujeito a altas temperaturas, tanto o aço inoxidável como o aço carbono, sofrem uma variação significativa das suas propriedades mecânicas. Com o aumento da temperatura verificam-se reduções da tensão de cedência e do módulo de elasticidade linear (CEN, 2005b). No caso do aço inoxidável, estas reduções são diferentes para cada tipo de aço dentro do mesmo grupo.

A variação do fator de redução do módulo de elasticidade ($k_{E,\theta}$) com a temperatura é igual para todos os tipos de aço inoxidável e está representada na Figura 4. A altas temperaturas, existe uma clara melhoria no comportamento mecânico, no que diz respeito ao módulo de elasticidade, por parte do aço inoxidável comparativamente ao aço carbono.

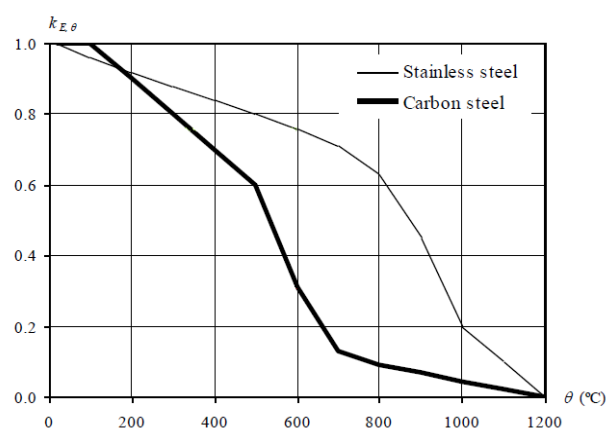


Figura 4 - Comparação do $k_{E,\theta}$ entre o aço inoxidável e o aço carbono (CEN, 2005b).

Tendo em conta a Figura 5, observa-se que, com o aumento da temperatura, o fator de redução correspondente à tensão limite de proporcionalidade ($k_{0,2p,\theta}$) e de tensão correspondente à extensão total de 2% ($k_{2,\theta}$), para os diferentes aços, sofre uma gradual redução. É possível ainda constatar que para, o aço 1.4003 (único tipo de aço ferrítico que se refere a Parte 1-2 do EC3), a variação deste fator com a temperatura é diferente das restantes classes. Este facto sugere que o tipo de aço inoxidável deve ser tido em conta no dimensionamento de elementos estruturais (Lopes e Vila Real, 2013).

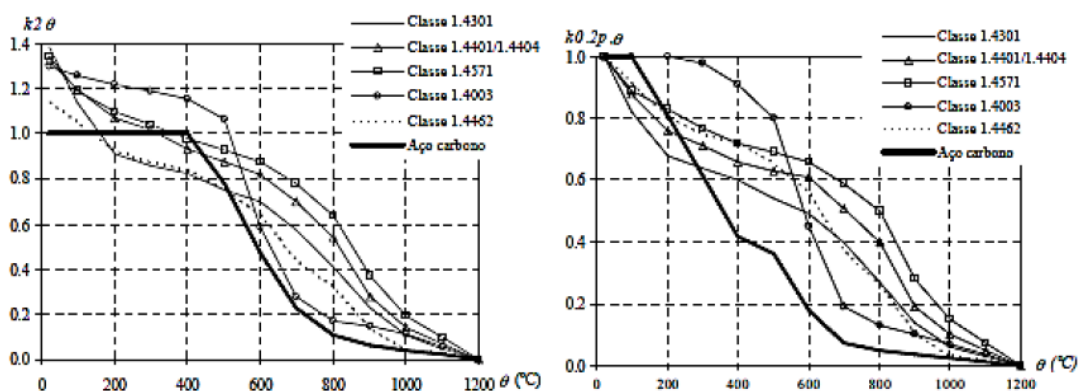


Figura 5 - Fatores de redução da tensão de cedência a altas temperaturas (Lopes e Vila Real, 2013; CEN, 2005b).

A Figura 6 a 20°C compara as leis dos aços inoxidável 1.4301 ($f_y = 210\text{MPa}$) e carbono S235 ($f_y = 235\text{MPa}$), onde se pode identificar a consideração do endurecimento no aço inoxidável.

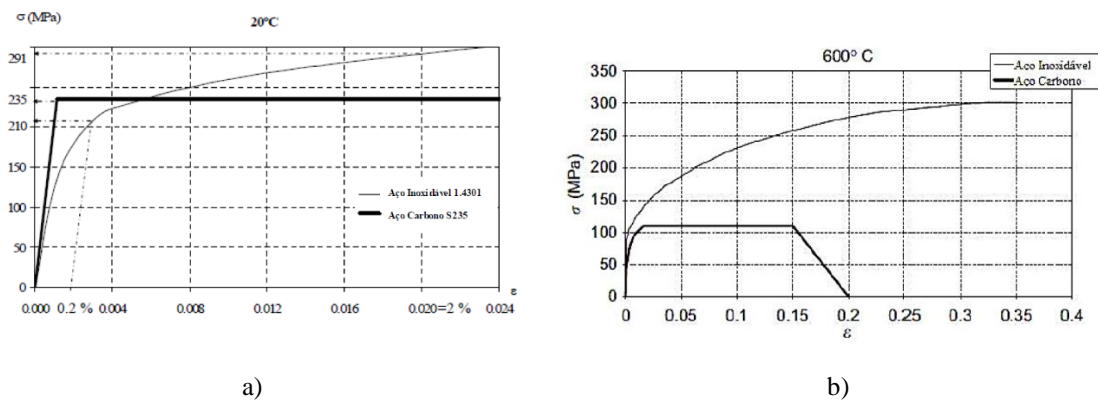


Figura 6 - Comparação da relação tensão-extensão para o aço carbono S235 e o aço inoxidável 1.4301:
a) 20°C (adaptado de Lopes, 2009; CEN, 2005b); b) 600°C (Lopes, 2009; CEN, 2005b).

Observa-se que mesmo sendo a tensão de cedência maior no aço carbono não é suficiente para um melhor comportamento mecânico deste. Tal acontece devido ao aço carbono S235 possuir uma plastificação sem endurecimento, enquanto o aço inoxidável 1.4301 possui uma plastificação com endurecimento (Gamelas, 2014).

A análise da Figura 6b demonstra o diferente comportamento ao fogo entre os aços. O aço carbono apresenta um comportamento linear até atingir a tensão de cedência, seguindo-se uma zona de patamar até à tensão de endurecimento (CEN, 2005b).

Capítulo 3

3. CÁLCULO ESTRUTURAL DE VIGAS E PILARES EM AÇO INOXIDÁVEL

3.1. Considerações gerais

Alguns dos aspetos de maior importância no comportamento ao fogo de secções em “I” e “H” em aço inoxidável são os fenómenos de encurvadura. Este conceito de estabilidade estrutural está estreitamente relacionado com a capacidade de uma estrutura conseguir estabelecer uma posição de equilíbrio após a introdução de uma perturbação externa (força ou deslocamento) (Pinto, 2010).

Os fenómenos de instabilidade podem ser distinguidos entre global (barras) e local (placas) e a sua influência no comportamento estrutural de um elemento irá depender da sua geometria (comprimento dos elementos, características da secção transversal, tipo de apoio).

Estes fenómenos de encurvadura correspondem ao efeito geometricamente não linear provocado pela compressão (Baptista, 2014).

3.2. Encurvadura Local

A encurvadura local das secções afeta os resultados da análise global duma estrutura, devendo ser assim considerada no seu dimensionamento (CEN, 2006b). A EN 1993-1-1 faz referência ainda que nas secções de Classe 4 deve-se ter em conta no seu dimensionamento os efeitos da encurvadura local de acordo com o indicado na EN 1993-1-5. As secções transversais da Classe 4 têm uma esbelteza elevada e sendo assim é necessário, muitas vezes, adicionar reforços transversais ou longitudinais, nas almas ou nos banzos (Simões da Silva, 2007).

Para compreender melhor o conceito deste fenómeno é apresentado de seguida um exemplo onde ocorre a encurvadura local em placas comprimidas axialmente.

Na Figura 7 está representado o momento em que a tensão de compressão exercida na placa é maior ou igual à tensão crítica de encurvadura local (σ_{cr}). Esta tensão crítica é definida como a menor tensão capaz de manter a placa numa forma ligeiramente fletida. Para tensões

inferiores, a placa volta para a sua forma inicial (Vila Real, 2010). A partir do momento em que as tensões se igualam a placa fica sujeita à encurvadura local.

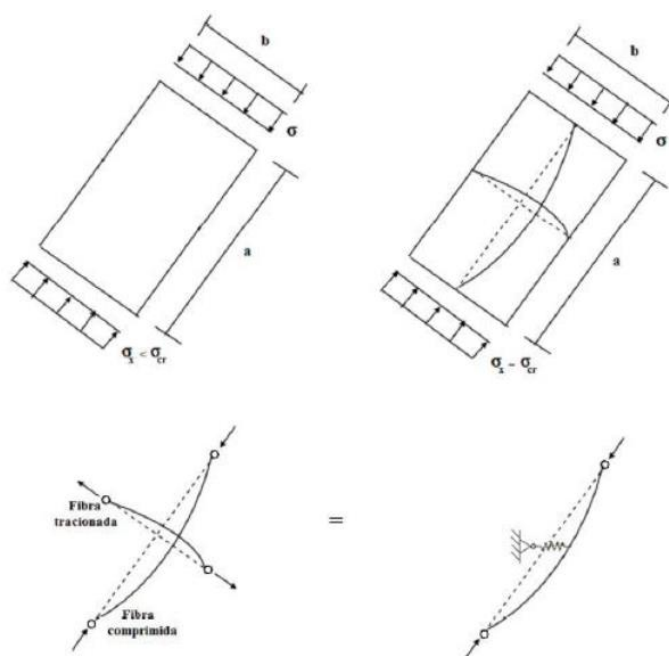


Figura 7 - Encurvadura de placa comprimida axialmente (Vila Real, 2010)

Relativamente às placas axialmente comprimidas (placas estas não reforçadas), em 1891 Bryan estudou o fenómeno numa placa retangular, com espessura t , simplesmente apoiada no seu contorno e submetida a uma tensão de compressão uniforme conforme representado na Figura 7 (Simões da Silva, 2007).

Em 1932 Von Karman estudou a avaliação da resistência última de uma placa comprimida uniaxialmente e constatou que a maior parte do carregamento é resistido pelas zonas contíguas aos bordos longitudinais da placa (largura efetiva), como ilustra a Figura 8 (Simões da Silva, 2007).

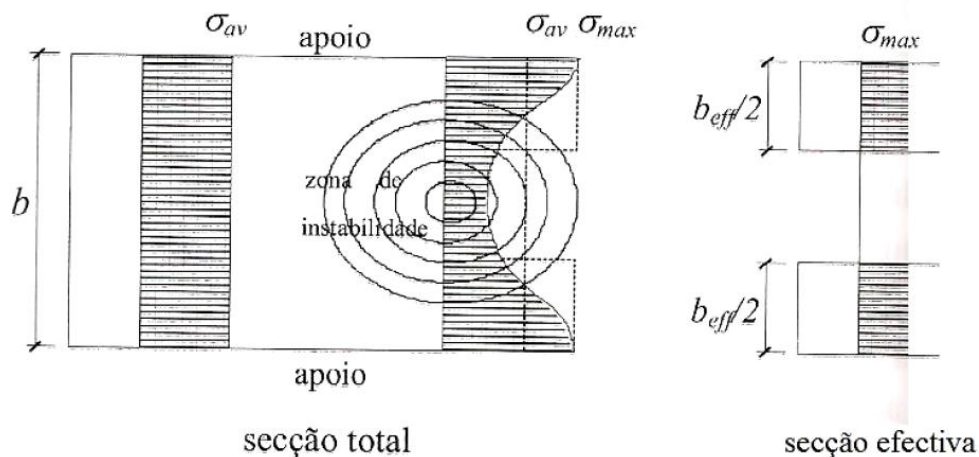


Figura 8 - Conceito de largura efetiva (Simões da Silva, 2007)

Segundo Karman, a largura efetiva é "a largura de uma placa fictícia sujeita a uma distribuição uniforme de tensões estaticamente equivalente à distribuição efetivamente instalada na placa real".

3.3. Classificação das secções

Segundo o Eurocódigo 3 (CEN, 2005a), a classificação das secções transversais tem como objetivo identificar em que medida a sua resistência e capacidade de rotação são limitadas pela ocorrência de encurvadura local. São definidas quatro classes para as secções transversais da seguinte forma:


- a) Classe 1: são aquelas em que se pode formar uma rótula plástica, com a capacidade de rotação necessária para uma análise plástica, sem redução da sua resistência;
- b) Classe 2: secções transversais que podem atingir o momento resistente plástico, mas cuja capacidade de rotação é limitada pela encurvadura local;
- c) Classe 3: são aquelas em que a tensão na fibra extrema comprimida, calculada com base numa distribuição elástica de tensões, pode atingir o valor da tensão de cedência, mas em que a encurvadura local pode impedir que o momento resistente plástico seja atingido;

d) Classe 4: secções transversais em que ocorre a encurvadura local antes de se atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção transversal;

A classificação da secção transversal depende da relação entre a largura e a espessura dos elementos comprimidos (ou parcialmente comprimidos) sobre o carregamento a que está sujeita. A secção é classificada segundo a classe mais elevada (mais desfavorável) desses mesmos elementos (CEN, 2005).

Para o aço carbono e inoxidável, os valores limite da relação entre as dimensões dos elementos comprimidos das Classes 1, 2 e 3 de elementos internos (alma), estão indicados na Tabela 5.

Tabela 5 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (Alma)
(EN 1993-1-1, 2010 & EN1993-1-4, 2006)

Componentes internos comprimidos			
			
Classe	Tipo de aço	Componente solicitado à flexão	Componente solicitado à compressão
1	Carbono	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$
	Inoxidável	$c/t \leq 56\varepsilon$	$c/t \leq 25,7\varepsilon$
2	Carbono	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$
	Inoxidável	$c/t \leq 58,2\varepsilon$	$c/t \leq 26,7\varepsilon$
3	Carbono	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$
	Inoxidável	$c/t \leq 74,8\varepsilon$	$c/t \leq 30,7\varepsilon$

Os valores limites para elementos salientes (banzos) estão indicados na Tabela 6 e na Tabela 7 para o aço carbono e para o aço inoxidável respetivamente (EN 1993-1-1, 2010).

Tabela 6 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (banzos) para aço carbono (EN 1993-1-1, 2010)

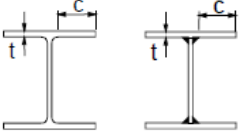
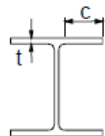
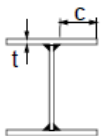
Banzos em consola			
			
Classe	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão	
		Extremidade comprimida	Extremidade tracionada
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq 9\epsilon/\alpha$	$c/t \leq 9\epsilon/(\alpha\sqrt{\alpha})$
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq 10\epsilon/\alpha$	$c/t \leq 10\epsilon/(\alpha\sqrt{\alpha})$
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$	

Tabela 7 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (banzos) para aço inoxidável (CEN, 2006a)

Banzos em consola				
 				
Classe	Secção tipo	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão	
			Extremidade comprimida	Extremidade tracionada
1	Enformados a frio	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	Soldados	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	Enformados a frio	$c/t \leq 10,4\epsilon$	$c/t \leq \frac{10,4\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10,4\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	Soldados	$c/t \leq 9,4\epsilon$	$c/t \leq \frac{9,4\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9,4\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
3	Enformados a frio	$c/t \leq 11,9\epsilon$	$c/t \leq 18,1t\sqrt{k_c}$, para k_c ver EN 1993-1-5	
	Soldados	$c/t \leq 11\epsilon$	$c/t \leq 16,7t\sqrt{k_c}$, para k_c ver EN 1993-1-5	

Sendo que,

$$\varepsilon = \left(\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right)^{0.5} \quad (1)$$

Onde f_y representa a tensão de cedência a 20°C.

No caso em que os perfis metálicos se encontram em situação de incêndio, a classificação das secções transversais é feita como à temperatura normal, mas o valor de ε deveria teoricamente ser obtido da seguinte forma (CEN, 2005b):

$$\varepsilon = \left(\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right)^{0.5} \left(\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right)^{0.5} \quad (2)$$

Analisando a Figura 9 podemos verificar que o aço inoxidável exibe um comportamento diferente do aço carbono.

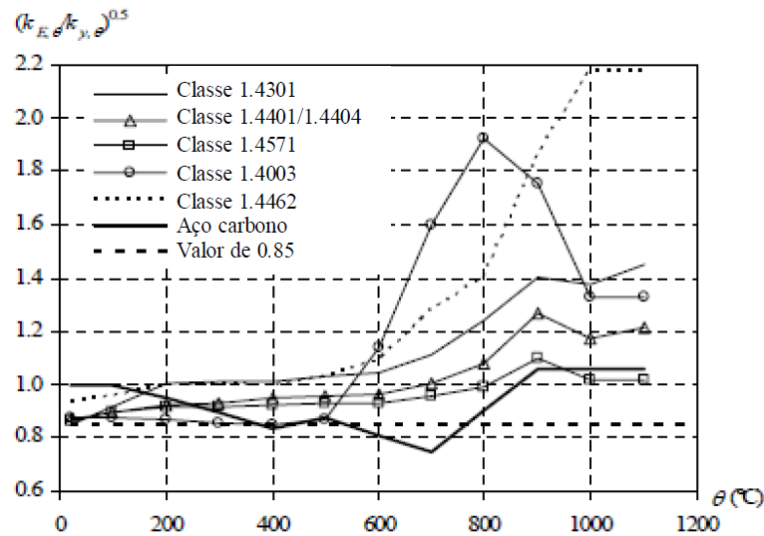


Figura 9 - Redução do fator para determinar a classe da secção transversal a elevadas temperaturas (adaptado de Lopes, 2009).

Como tal, de forma a simplificar, a Parte 1-2 do EC3 (CEN, 2005b) recomenda o uso de um fator de redução de 0,85 para qualquer tipo de aço. Ou seja:

$$\varepsilon = \left(\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right)^{0.5} \times 0.85 \quad (3)$$

Apesar de não ser o mais correto, já que corresponde a admitir que todas as classes de aços inoxidáveis têm o mesmo valor tanto da tensão de cedência f_y como do módulo de elasticidade E , podemos admitir que o valor de 0,85 está do lado da segurança.

Caso um elemento não cumpra os requisitos da Classe 3 é então considerado como sendo de Classe 4.

Para melhor compreender o comportamento de elementos com secções de diferentes classes, está ilustrada na Figura 10 a classificação de uma secção transversal para uma viga sujeita a uma carga pontual a meio vão.

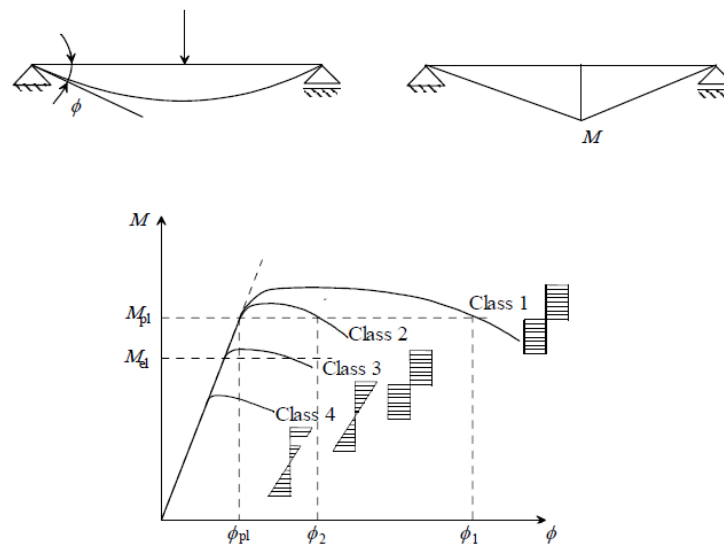


Figura 10 - Curvas para diferentes classificações da secção transversal

3.4. Resistência da secção de elementos em “I” à temperatura normal de acordo com o EC3

Nesta dissertação serão analisados dois esforços: compressão axial e momento fletor no eixo forte, sendo que, à temperatura normal, segundo a EN 1993-1-1 (CEN, 2005a), o valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão uniforme de uma secção transversal em aço carbono ou inoxidável é determinado do seguinte modo:

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}, \text{ para as secções transversais da Classe 1, 2 ou 3;} \quad (4)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}}, \text{ para as secções transversais da Classe 4.} \quad (5)$$

O valor de cálculo do momento fletor resistente de uma secção transversal em relação a um dos eixos principais é determinado da seguinte forma:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}, \text{ para as secções transversais da Classe 1 ou 2;} \quad (6)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}}, \text{ para as secções transversais da Classe 3;} \quad (7)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}}, \text{ para as secções transversais da Classe 4;} \quad (8)$$

Sendo f_y a tensão de cedência, $\gamma_{M0} = 1$ ou $\gamma_{M0} = 1,1$ para o aço carbono e inoxidável respetivamente e o módulo de flexão efetiva, $W_{eff,min}$, calculado para o eixo forte a partir de:

$$W_{eff,y} = \min(W_{eff,sup}; W_{eff,inf}) \quad (9)$$

$$W_{eff,sup} = \frac{I_{eff,y}}{v_s} \quad (10)$$

$$W_{eff,inf} = \frac{I_{eff,y}}{v_i} \quad (11)$$

Onde $I_{eff,y}$ representa a inércia efetiva segundo o eixo forte yy , a partir da secção efetiva do perfil; v_s e v_i são as distâncias desde o centro de gravidade da secção transversal até ao banzo superior e inferior respetivamente.

As secções efetivas de Classe 4 são determinadas tendo em conta a EN 1993-1-5, onde é aplicado o método das larguras efetivas para ter em consideração as reduções de resistência devidas aos efeitos da encurvadura local. A diferença neste calculo para os dois tipos de aço (carbono e inoxidável) está na determinação do fator de redução ρ .

Está ilustrado na Figura 11 a representação da secção efetiva das secções de Classe 4.

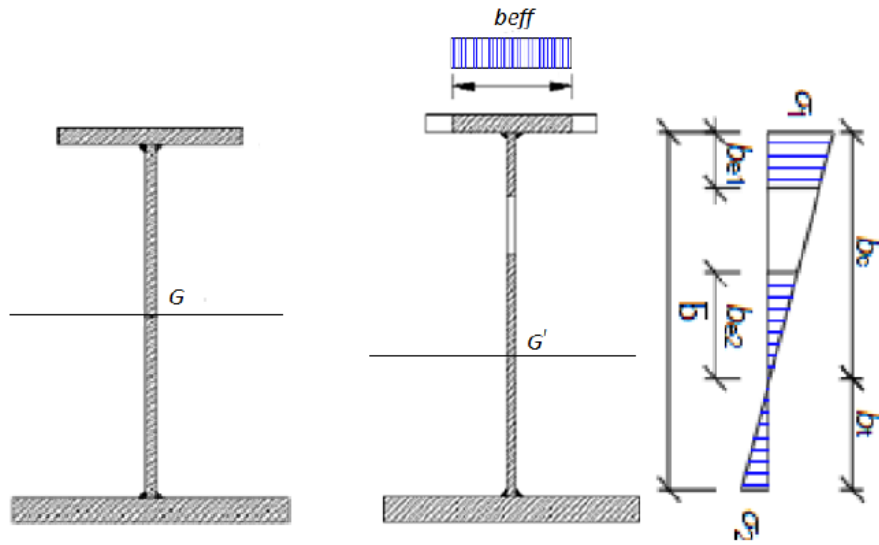


Figura 11 - Secção transversal de Classe 4 submetida a momento fletor

Para os dois tipos de aço (carbono e inoxidável), o fator de redução é determinado da seguinte forma:

Tabela 8 - Fator de redução para os dois tipos de aço.

	Aço carbono	Aço inoxidável
Elementos internos comprimidos	$\rho = 1,0$ para $\bar{\lambda}_p \leq 0,673$ $\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$ para $\bar{\lambda}_p > 0,673$, onde $(3 + \psi) \geq 0$	$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2}$ com $\rho \leq 1$
Elementos salientes comprimidos	$\rho = 1,0$ para $\bar{\lambda}_p \leq 0,748$ $\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$ para $\bar{\lambda}_p > 0,748$	Enformados a frio: $\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,231}{\bar{\lambda}_p^2}$, com $\rho \leq 1$ Soldadas: $\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,242}{\bar{\lambda}_p^2}$, com $\rho \leq 1$

Com,

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \quad (12)$$

Em que,

t é a espessura do elemento;

\bar{b} é a largura livre do elemento;

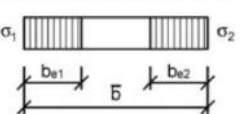
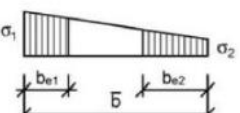
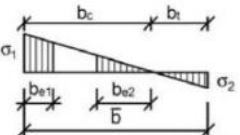
k_σ é o fator de encurvadura;

ε é o modulo de elasticidade.

A distribuição de tensões e o calculo da largura efetiva são determinados através das figuras seguintes.

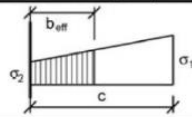
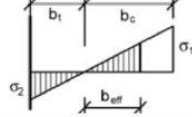
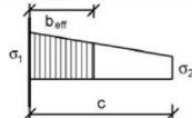
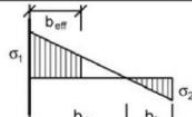
Para elementos internos comprimidos (almas):

Tabela 9 - Elementos internos comprimidos (almas) (EN1993-1-1, 2006)

Distribuição de tensões (compressão positiva)				Largura efectiva: b_{eff}		
				$\psi = 1$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi > 0$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Factor encurvad. k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Para elementos salientes comprimidos (banzos):

Tabela 10 - Elementos salientes comprimidos (banzos) (EN 1993-1-5, 2006)

Distribuição de tensões (compressão positiva)		Largura efectiva: b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0$:			
		$b_{eff} = \rho \cdot c$			
		$\psi < 0$:			
		$b_{eff} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Factor de encurvad.: k_ϕ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0$:			
		$b_{eff} = \rho \cdot c$			
		$\psi < 0$:			
		$b_{eff} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Factor de encurvad.: k_ϕ	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

No caso em que os perfis metálicos se encontram em situação de incêndio, a secção efetiva considerada é a calculada à temperatura normal.

3.5. Resistência da secção em situação de incêndio de acordo com o EC3

3.5.1. Aço carbono

Em situação de incêndio, segundo a EN 1993-1-2 (CEN, 2005a), tal como para temperatura normal (ponto 3.4), o valor de cálculo da resistência de um elemento comprimido em aço carbono com uma secção transversal da Classe 1, 2 ou 3 com uma temperatura uniforme θ_a deverá ser determinado a partir de:

$$N_{fi,t,Rd} = A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi} \quad (13)$$

Em que $k_{y,\theta}$ é obtido através da Figura 5. Para secções de Classe 4, segundo o Anexo E da EN 1993-1-2, a área é substituída pela área efetiva, A_{eff} e $k_{y,\theta}$ corresponde a $k_{0,2p,\theta}$.

Para vigas, segundo a EN 1993-1-2 (CEN, 2005a), o valor de cálculo do momento resistente de uma secção transversal com uma temperatura uniforme θ_a deverá ser determinado a partir de:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} [\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi}] M_{c,Rd} \quad (14)$$

Sendo que, $M_{c,Rd}$, para secções de Classe 1 e 2, é equivalente a W_{pl} . Para secções de classe 3 corresponde a $W_{el,min}$ e por fim, para secções de classe 4, segundo o Anexo E da EN 1993-1-2, corresponde a $W_{eff,min}$ e $k_{y,\theta}$ é equivalente a $k_{0,2p,\theta}$.

O Anexo E refere ainda que a área da secção transversal efetiva e o módulo de flexão efetivo deverão ser determinados conforme a EN 1993-1-5, ou seja, com base nos materiais a frio.

3.5.2. Aço inoxidável

Para o aço inoxidável, o calculo é análogo ao aço carbono, onde apenas se altera o parâmetro $k_{y,\theta}$ em função da classe do aço.

Para secções de classe 1, 2 e 3, segundo o Anexo C da Parte 1-2 da EN1993-1-2 (CEN, 2005), $k_{y,\theta}$ representa o fator de redução de cálculo respetivo à tensão de cedência correspondente a uma extensão de 2%.

Para as secções de classe 4, o Anexo E da EN 1993-1-2 indica que o valor de cálculo da tensão de cedência deverá ser considerado igual à tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%. Este valor, representado como $f_{0,2p,\theta}$ segundo o mesmo anexo, é determinado usando $k_{0,2p,\theta} = f_{0,2p,\theta}/f_y$, sendo $k_{0,2p,\theta}$ o fator de redução de cálculo determinado a partir do Anexo C da EN 1993-1-2.

3.6. Proposta de (Couto *et al*, 2013) para secções de Classe 4 em aço carbono

Recentemente, Couto *et al*. (2013) propuseram que o valor limite da extensão para secções transversais em aço carbono de classe 4 seja de 2%, com um cálculo da secção efetiva que considera a influência das altas temperaturas, sendo que:

Para os elementos internos comprimidos, Couto *et al* (2013) propuseram:

$$\rho_{\theta} = \frac{(\bar{\lambda}_p + \alpha_{\theta})^{2\beta_{\theta}} - 0.055(3 + \psi)}{(\bar{\lambda}_p + \alpha_{\theta})^{2\beta_{\theta}}} \leq 1.0 \quad (15)$$

Para os elementos salientes comprimidos, Couto *et al* (2013) propuseram:

$$\rho_{\theta} = \frac{(\bar{\lambda}_p + \alpha_{\theta})^{\beta_{\theta}} - 0.188}{(\bar{\lambda}_p + \alpha_{\theta})^{2\beta_{\theta}}} \leq 1.0 \quad (16)$$

Sendo os coeficientes usados apresentados na tabela seguinte:

Tabela 11 - Coeficientes a ser usados a uma temperatura conservativa de $\theta_a = 700^{\circ}\text{C}$.

Elementos internos comprimidos	Elementos salientes comprimidos
$\alpha_{\theta} = 0.9 - \frac{0.205}{\varepsilon_{\theta}}$	$\alpha_{\theta} = 1.1 - \frac{0.412}{\varepsilon_{\theta}}$
$\beta_{\theta} = 1.583$	$\beta_{\theta} = 1.283$
$\varepsilon_{\theta} = 0.85\varepsilon = 0.85 \sqrt{235/f_y}$	

Neste trabalho, esta proposta foi testada para secções transversais em aço inoxidável.

Capítulo 4

4. COMPORTAMENTO DE PLACAS

4.1. Considerações gerais

Na construção em aço, o objetivo de obter o elemento estrutural mais económico favorece o uso de elementos transversalmente delgados. Além disso, as secções transversais podem ser consideradas como uma junção de placas, as quais são geralmente referidas como elementos internos (alma) e salientes (banzo) e, se estas placas foram suficientemente finas, elas podem se deformar mais facilmente, impedindo que se chegue ao limite da tensão de cedência em algumas partes da secção transversal, condicionando assim a carga máxima dos elementos estruturais. De acordo com o Eurocódigo 3, este tipo de elementos transversais, estão classificados como sendo de classe 4 e as regras de dimensionamento à temperatura normal estão bem definidas. Quando sujeito ao fogo, segundo investigações recentes de Couto (2015), Fontana e Knobloch (2006), Renaud e Zhao (2006) e Quiel e Garlock (2010) mostram que as suas regras de dimensionamento são muito conservativas para as secções de classe 4 e conseqüentemente surge a necessidade de desenvolver formulas mais realísticas para contabilizar a deformação local a elevadas temperaturas.

À temperatura normal, o Eurocódigo 3 indica, na Parte 1-5, um método para considerar os efeitos da deformação local no seu dimensionamento: o método da largura efetiva (referido anteriormente). A temperaturas elevadas, o mesmo conceito é utilizado e, no Anexo E da Parte 1-2 do mesmo Eurocódigo, algumas recomendações são dadas para o dimensionamento de elementos de classe 4 em aço em condições de incêndio. Neste anexo é sugerido o uso do método simplificado adotando o valor da tensão de proporcionalidade de 0.2% em vez da tensão correspondente à extensão total de 2%, tal como normalmente é feito para o dimensionamento de secções com outras classes, em situação de incêndio. Adicionalmente, é dito que a secção efetiva pode ser calculada segundo o método da largura efetiva para temperatura normal. O trabalho recente de Ranby (1998), demonstra que esta metodologia é segura e leva a um resultado preciso no calculo da carga última de placas suscetíveis à deformação local a elevadas temperaturas.

Os limites da relação entre a largura e espessura pela qual as placas são suscetíveis à deformação local a temperatura normal estão definidas no Eurocódigo 3 na Parte 1-1. Em condições de incendio estes limites correspondem a 85% do valor à temperatura normal.

Usar um valor reduzido em situação de incêndio pode levar à obtenção de classificações superiores, mas previne que essa classificação se altere durante o aumento da temperatura.

Neste capítulo, um estudo paramétrico foi desenvolvido com a ajuda do programa de elementos finitos chamado SAFIR, com o objetivo de avaliar a resistência última de placas em aço inoxidável com diferentes cargas e a elevadas temperaturas. Comparações entre os resultados obtidos e as fórmulas existentes demonstram a necessidade de se criar novas expressões para o dimensionamento de elementos em aço inoxidável a elevadas temperaturas.

4.2. Considerações para a deformação local a elevadas temperaturas

Na Parte 1-2 do Eurocódigo 3, para as secções de Classe 4 é sugerido o uso da temperatura crítica de 350°C caso mais nenhum calculo seja efetuado. Esta indicação é, segundo Couto *et al*, considerada muito conservativa e, nesse sentido, algumas indicações são dadas no anexo E para o dimensionamento deste tipo de secções transversais. De acordo com este anexo, quando se usam modelos simples de dimensionamento os mesmos princípios são aplicados a secções transversais de diferentes classes, mas as propriedades das secções efetivas devem ser determinadas dependendo no material utilizado a temperatura normal.

A elevadas temperaturas, o coeficiente de redução para a deformação das placas é determinado a partir da expressão seguinte.

$$\rho_{\theta} = \rho_{\theta}(\bar{\lambda}_{p,\theta}) \quad (17)$$

Sendo que,

$$\bar{\lambda}_{p,\theta} = \sqrt{\frac{f_{y,\theta}}{\sigma_{cr,\theta}}} = \sqrt{\frac{k_{0.2p,\theta}}{k_{E,\theta}}} \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad (18)$$

4.3. Estudo numérico de placas

4.3.1. O programa SAFIR

O SAFIR é um programa de elementos finitos, originalmente desenvolvido na Universidade de Liège, que tem por base vários tipos de elementos, métodos de cálculo e comportamentos de materiais. É essencialmente utilizado para análise avançada de estruturas a temperaturas elevadas (Franssen, 2011).

A estratégia de cálculo é baseada num processo incremental (“passo a passo”), permitindo obter, até ao colapso da estrutura, os deslocamentos em cada nó e os esforços (axial, de corte, momento fletor e tensões) nos pontos de integração de cada elemento finito para uma determinada temperatura.

O programa SAFIR tem vindo a ser aplicado com sucesso em vários casos de estudo, apresentando resultados satisfatórios quando comparado com outros programas, soluções teóricas em aço inoxidável ou dados de ensaios experimentais. (Lopes, 2009; Scifo, 2013).

4.3.2. Modelo numérico

Para calcular a carga última das placas retangulares ($a \times b$ com $a > b$) foi usado o programa SAFIR. As placas foram divididas em vários elementos quadrados formando uma grelha. Cada elemento tem quatro nós e seis graus de liberdade (3 translações e 3 rotações). Os elementos de casca adotam a teoria de Kirchhoff que foi anteriormente validada por Talamona e Franssen. Anteriormente foi realizado por Couto *et al* um estudo acerca da densidade da grelha a utilizar e a solução adotada foi a utilização de placas retangulares com as dimensões de $a = 1.6$ m e $b = 0.4$ m usando 80 elementos ao longo do comprimento a e 20 elementos ao longo da largura b . Estas dimensões e a respetiva grelha adotadas neste estudo estão representadas na Figura 12

Foram consideradas condições de fronteira como restrição aos deslocamentos verticais e de rotação nas bordas da placa. As cargas foram aplicadas ao modelo como forças e foram usados elementos de casca com espessura superior na borda da placa para evitar problemas

numéricos. O modelo numérico usado para calcular a carga máxima de uma placa simplesmente apoiada em 3 lados está representado na Figura 12.

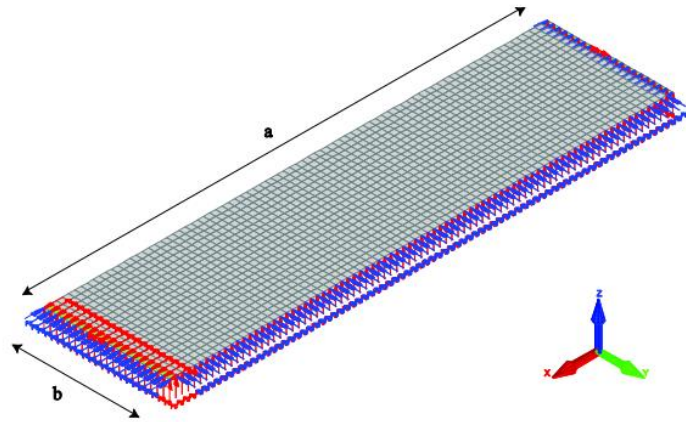


Figura 12 - Exemplo do modelo numérico usado para calcular a resistência última de uma placa.

Para este estudo foram analisadas as placas a uma temperatura normal de 20°C e em situação de incêndio para as temperaturas de 350°C, 450°C, 550°C e 650°C.

Foram também introduzidas imperfeições geométricas ao modelo alterando as coordenadas dos pontos nodais. A amplitude das imperfeições geométricas foi considerada como 80% de $b/50$ para as placas consideradas como banzos e 80% de $b/100$ para placas consideradas como almas, seguindo as recomendações da EN 1090-2.

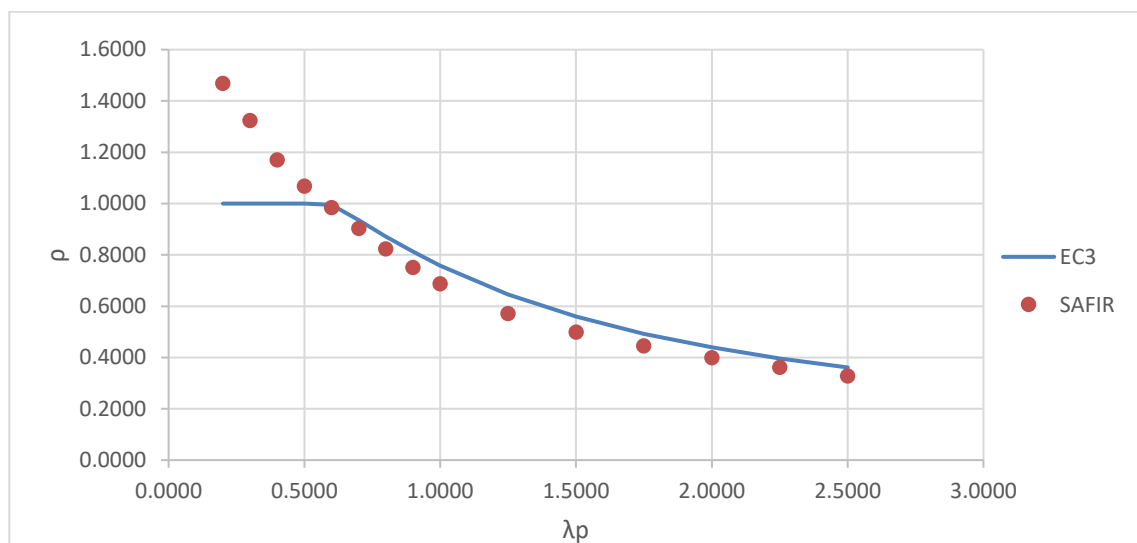
4.4. Resultados a temperatura normal

4.4.1. Elementos sujeitos a compressão

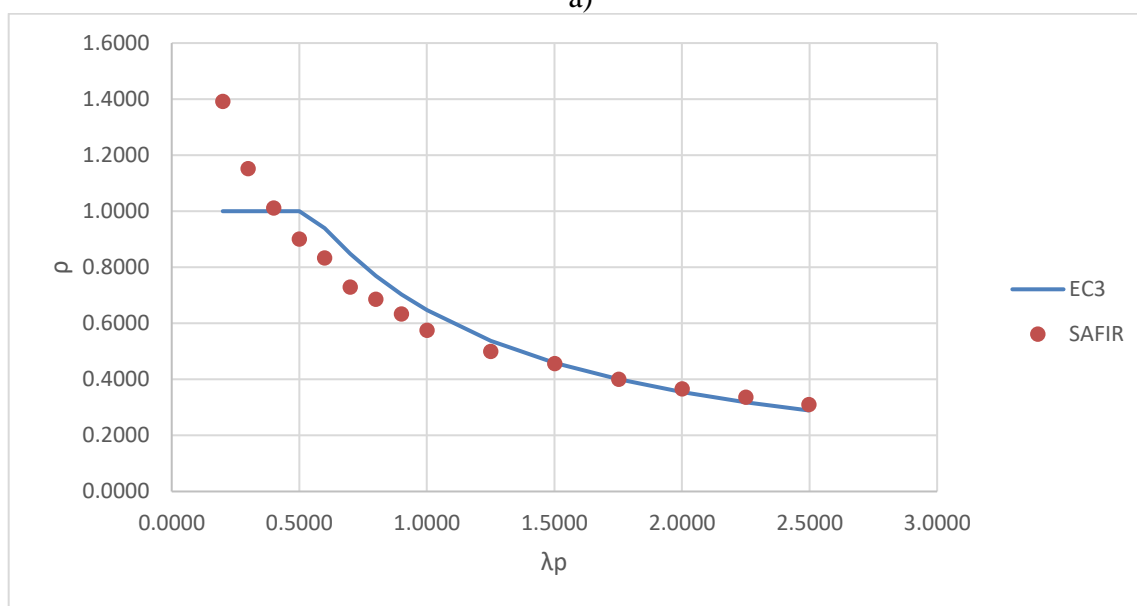
Elementos sujeitos à compressão axial têm ambos o banzo (elemento saliente) e a alma (elemento interno) comprimidos. A temperatura normal, a carga última dos elementos exteriores (banzos) e dos elementos interiores (alma) sujeitos a compressão em aço inoxidável é mostrada na Figura 13. Nestes gráficos, os resultados numéricos foram determinados de acordo com a seguinte equação.

$$\rho = \frac{\sigma_m}{f_y} = \frac{b_{eff}}{b} \quad (19)$$

Sendo ρ o fator de redução para a resistência à deformação da placa e σ_m o valor obtido com recurso ao SAFIR para a carga última da placa.



a)



b)

Figura 13 - Carga última de placas para elementos salientes a) e internos b) sujeitos a compressão à temperatura normal.

Podemos visualizar que os resultados numéricos obtidos estão em concordância com a curva obtida segundo o EC3, dada pela equação representada na Tabela 8.

Na Figura 14 está representada uma simulação da deformada típica durante o colapso de uma placa correspondente a um elemento saliente e outra correspondente a um elemento interno respetivamente, ambas sujeitas a esforço de compressão.

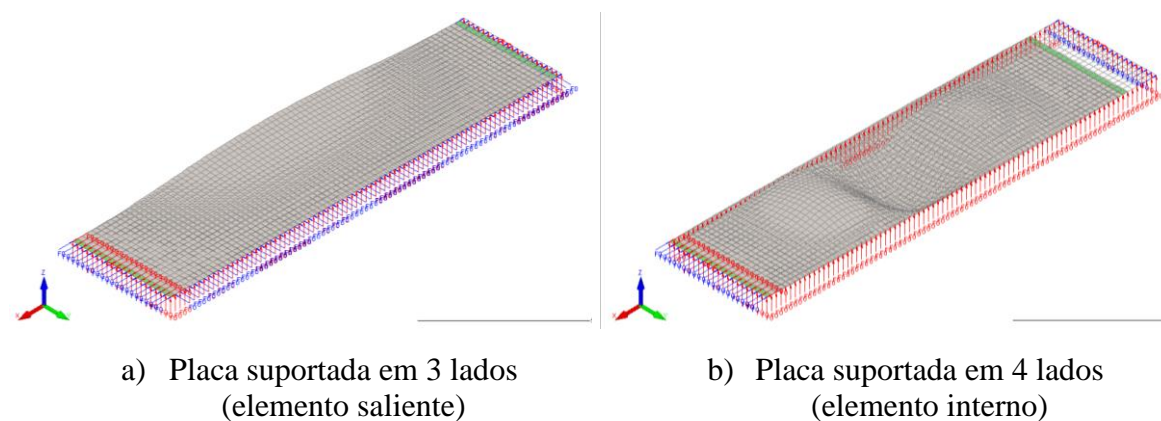


Figura 14 - Forma da deformada de placas sujeitas a compressão em situação de colapso.

4.4.2. Elementos sujeitos a flexão

Elementos em “I” sujeitos à flexão no eixo forte têm o banzo comprimido (visto no ponto anterior) e a alma fletida, analisada neste ponto. A resistência última da placa de elementos internos (alma) sujeita a flexão é mostrado na Figura 15.

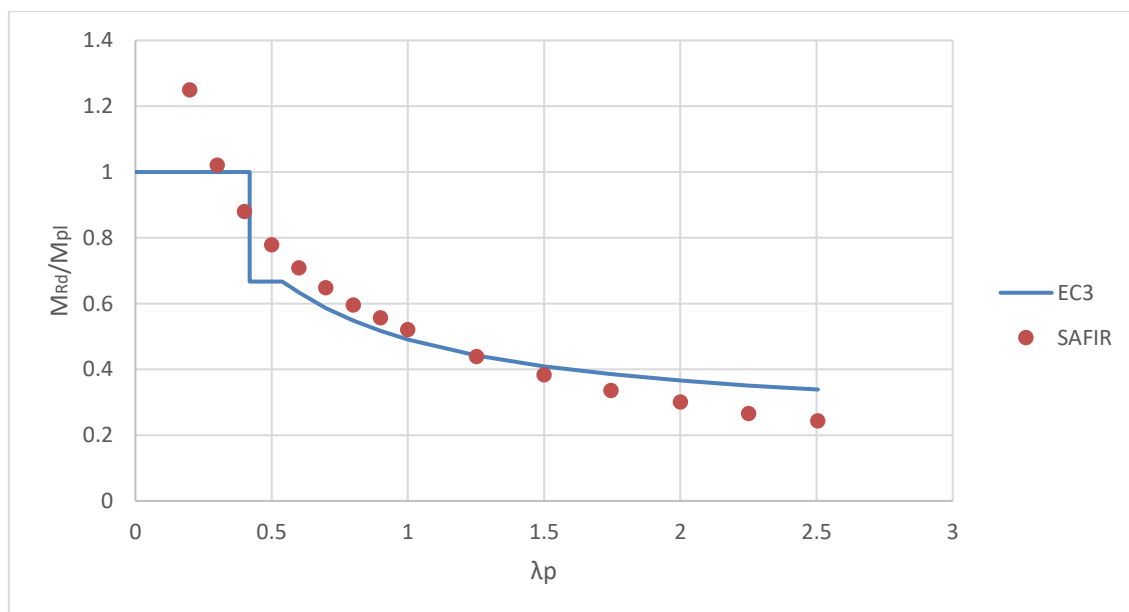


Figura 15 - Carga última de placas sujeitas a flexão à temperatura normal.

Uma vez que a resistência à deformada da placa varia dependendo da sua classificação em relação à deformação local, de acordo com o EC3

$$M_{Rd} = \begin{cases} M_{pl,Rd} = W_{pl,t}f_y/\gamma_{M0} & \bar{\lambda}_p \leq 0.419 \\ M_{el,Rd} = W_{el,y}f_y/\gamma_{M0} & 0.419 \leq \bar{\lambda}_p \leq 0.539 \\ M_{eff,Rd} = W_{eff,y}f_y/\gamma_{M0} & \bar{\lambda}_p > 0.539 \end{cases} \quad (20)$$

Onde $M_{pl,Rd}$, $M_{el,Rd}$ e $M_{eff,Rd}$ representam a resistência à deformação plástica, resistência à deformação elástica e a resistência à deformação efetiva respetivamente para uma placa.

Na Figura 15 observa-se que os resultados numéricos estão relativamente perto da curva dada pelo EC3 para placas de Classe 4 ($\bar{\lambda}_p > 0.539$). Para as restantes classes os resultados numéricos mostram que a transição de Classe 1 para Classe 3 é bem mais suave do que a curva dada pelo EC3, sendo esta pouco conservativa para determinados valores de esbelteza.

Na Figura 16 está representada uma simulação da deformada típica durante o colapso de uma placa correspondente a um elemento interno sujeito a esforço de flexão.

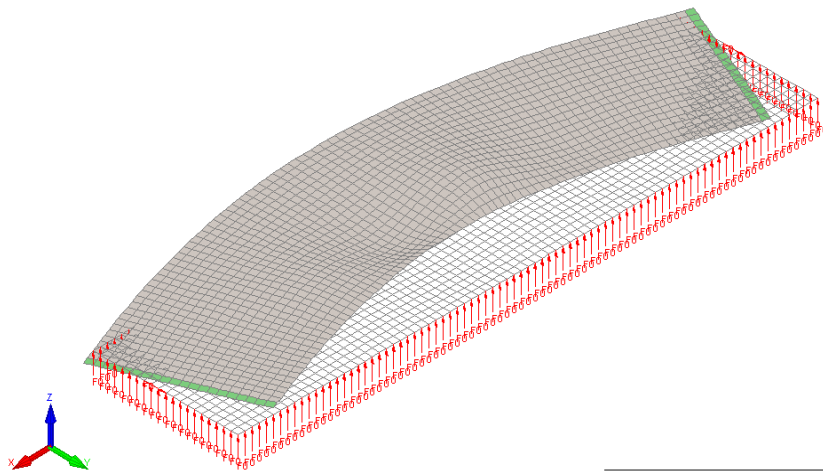


Figura 16 - Forma da deformada de uma placa sujeita a flexão em situação de colapso.

4.5. Resultados a elevada temperatura

4.5.1. Elementos sujeitos a compressão

A elevadas temperaturas, a equação para determinar o fator de redução para a deformação da placa tem que ser adaptada devido à transição que ocorre quando se passa da Classe 3 para a Classe 4 pois, a tensão a considerar é a correspondente ao limite de proporcionalidade a 0.2% da resistência e não 2% da capacidade total como para as classes 1, 2 e 3, levando a uma descontinuidade na curva.

De acordo com o Eurocódigo 3, o fator de redução para a deformação da placa a elevadas temperaturas é determinado, para elementos internos sujeitos a compressão, a partir de:

$$\begin{aligned} \rho &= 1 && \text{para } \bar{\lambda}_p \leq 0.636 \\ \rho &= \frac{0.772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0.125}{\bar{\lambda}_p^2} && \text{para } \bar{\lambda}_p > 0.636 \end{aligned} \quad (21)$$

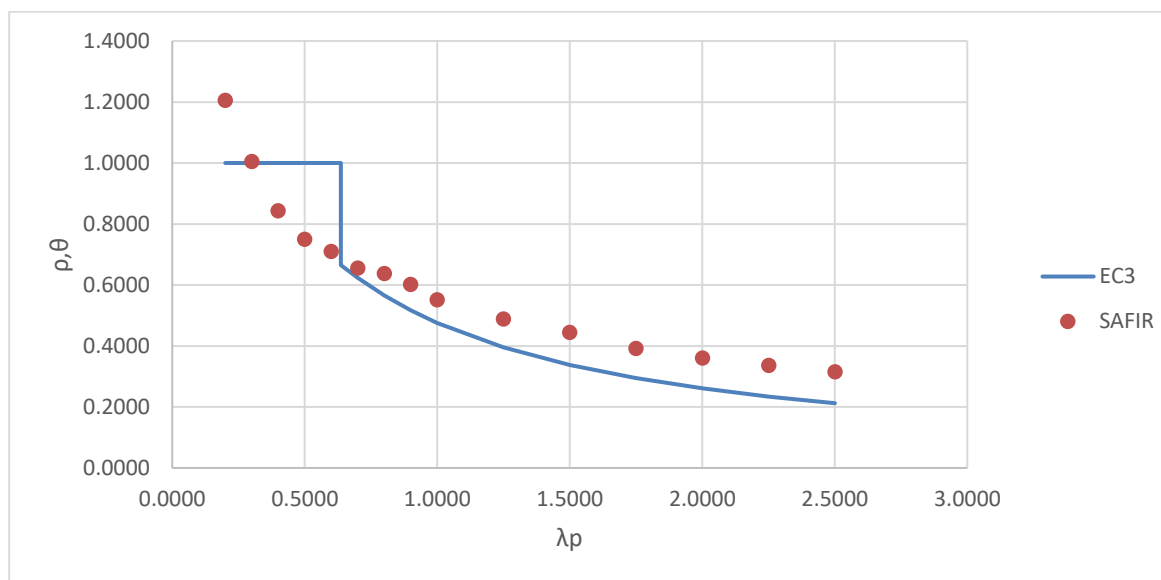
Para elementos salientes sujeitos a compressão:

$$\begin{aligned} \rho &= 1 && \text{para } \bar{\lambda}_p \leq 0.822 \\ \rho &= \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0.242}{\bar{\lambda}_p^2} && \text{para } \bar{\lambda}_p > 0.822 \end{aligned} \quad (22)$$

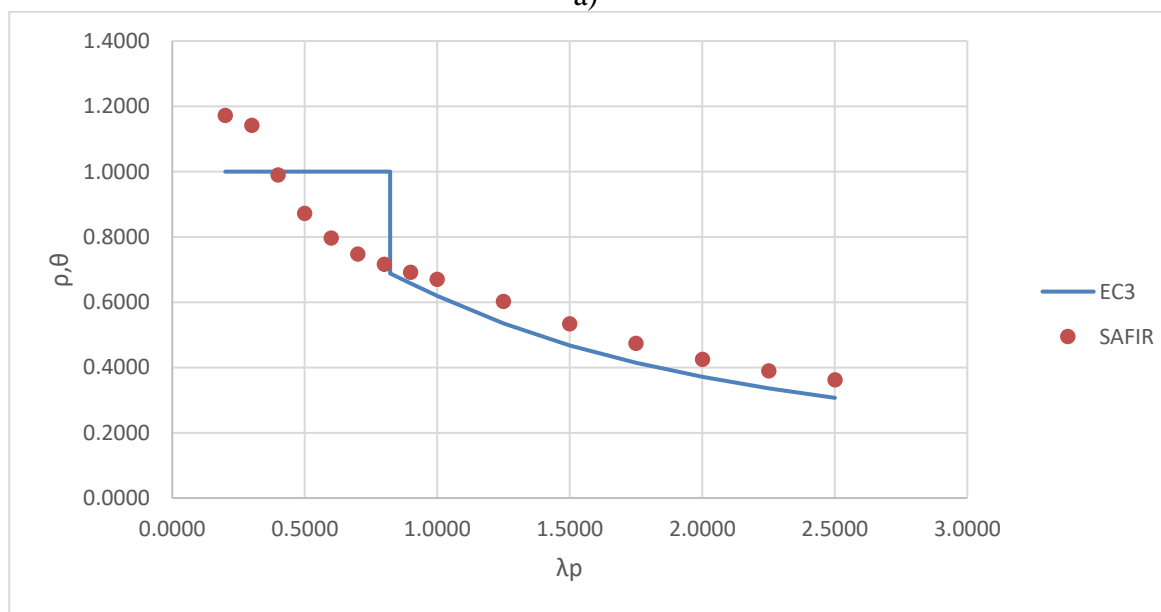
Sendo o coeficiente de redução em situação de incêndio determinado por:

$$\rho_\theta = \frac{N_{c,Rd}}{N_{Rd}} = \rho \frac{f_{y,\theta}}{f_{y,2,\theta}} \quad (23)$$

Da Figura 17 à Figura 20 estão representadas as cargas últimas dos elementos internos e salientes sujeitos a compressão obtidos através do SAFIR para as diferentes temperaturas e uma comparação com o EC3.

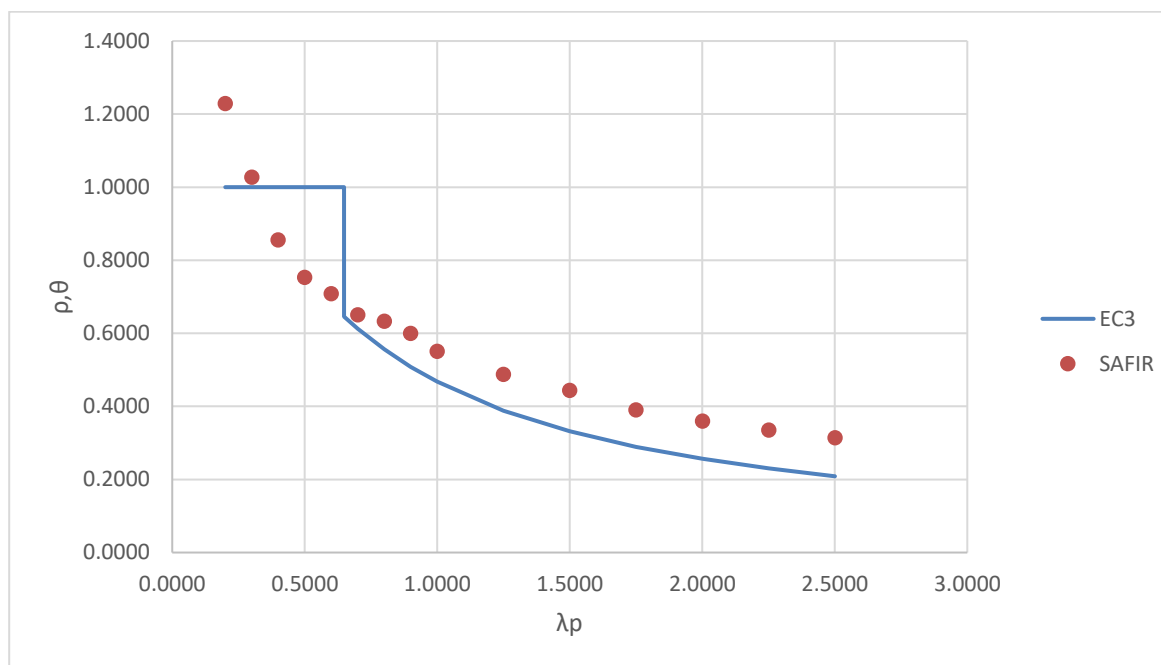


a)

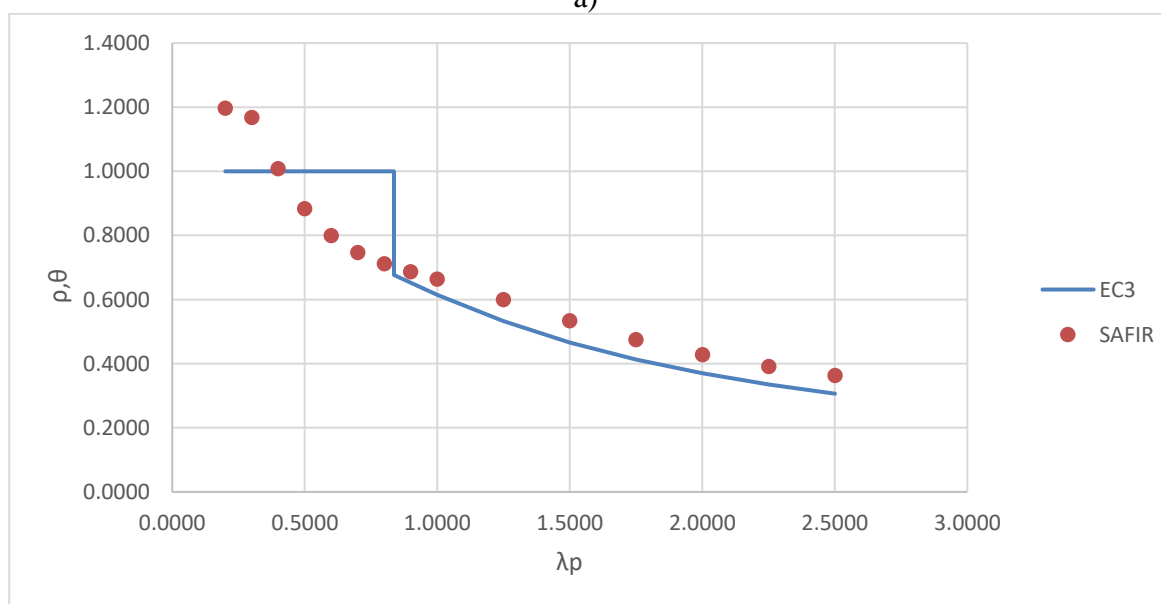


b)

Figura 17 – Carga última de placas de elementos internos a) e elementos salientes b) sujeitas a compressão a uma temperatura de 350°C.

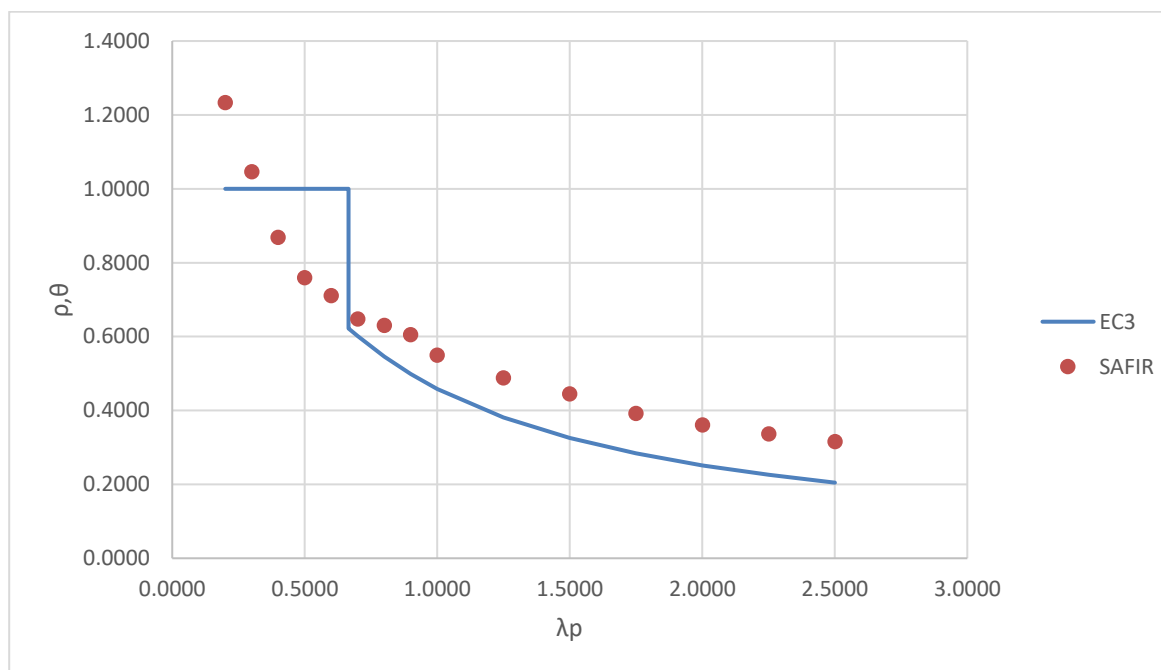


a)

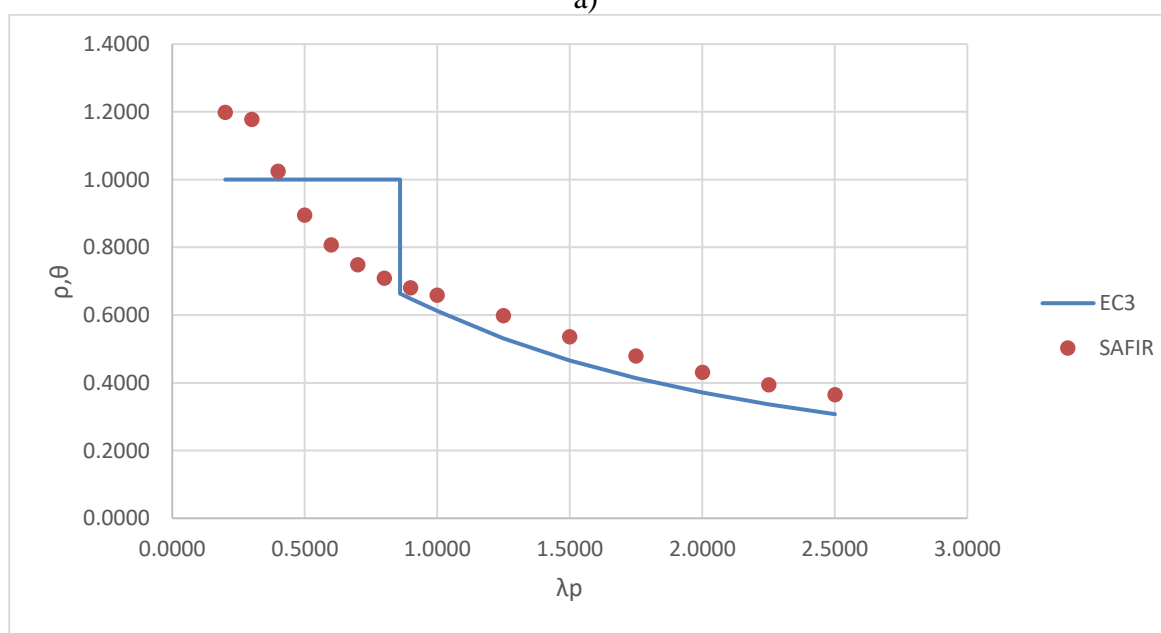


b)

Figura 18 - Carga última de placas de elementos internos a) e elementos salientes b) sujeitas a compressão a uma temperatura de 450°C.

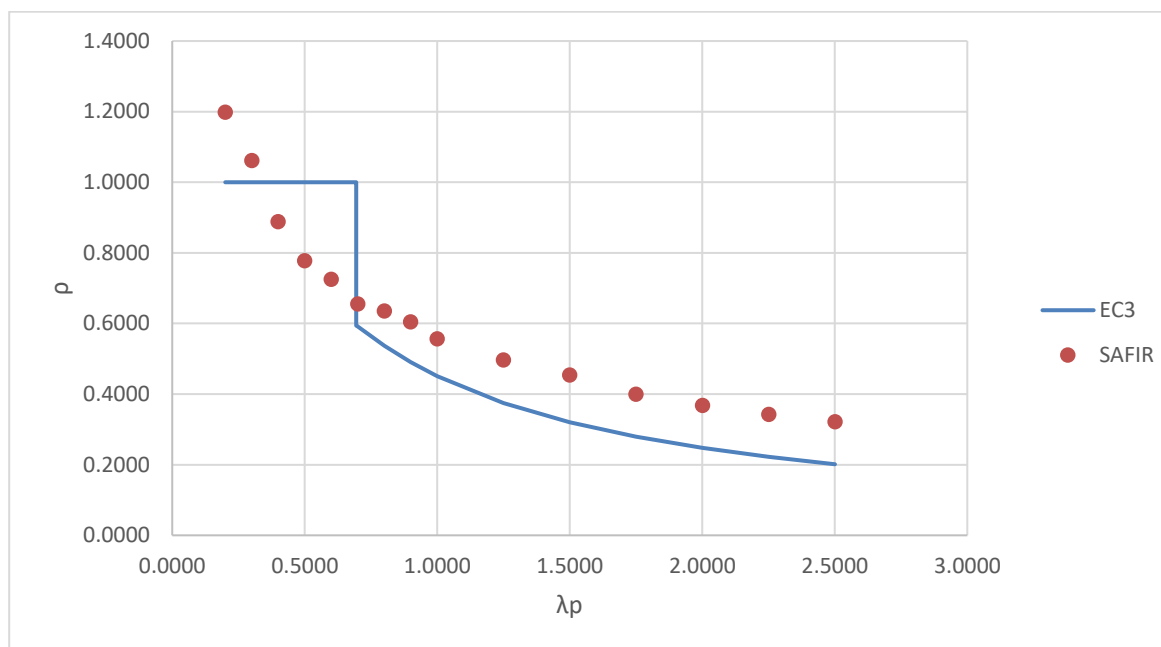


a)

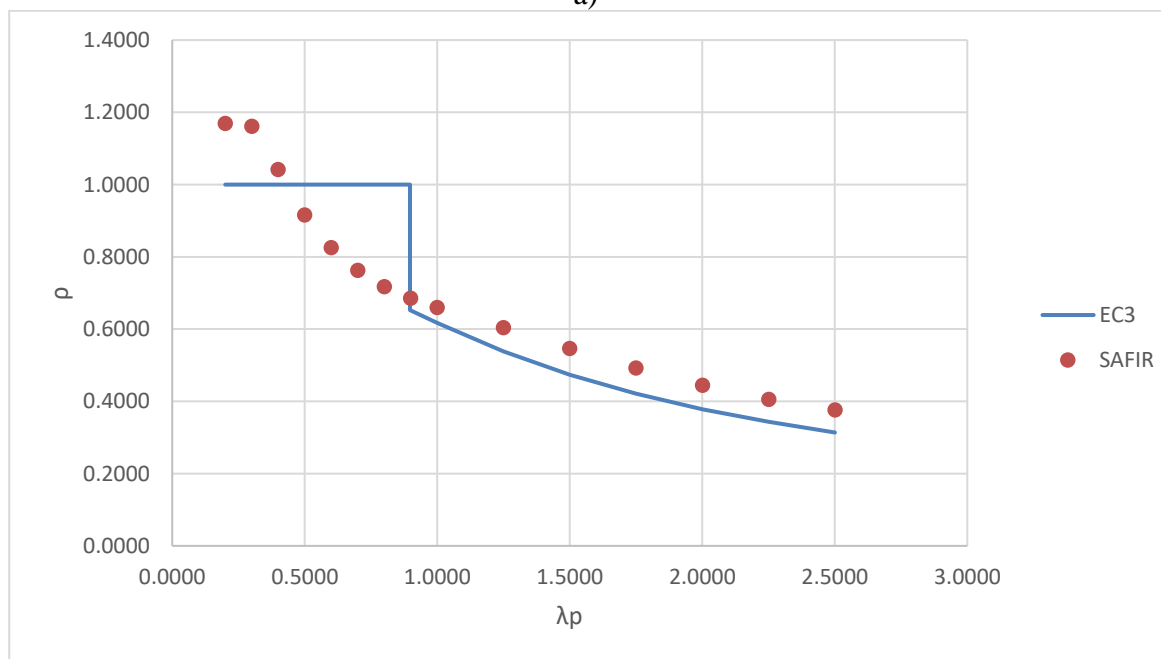


b)

Figura 19 - Carga última de placas de elementos internos a) e elementos salientes b) sujeitas a compressão a uma temperatura de 550°C.



a)



b)

Figura 20 - Carga última de placas de elementos internos a) e elementos salientes b) sujeitas a compressão a uma temperatura de 650°C.

Para os elementos saliente observa-se que, a elevadas temperaturas e para elementos de Classe 4, existe uma maior aproximação entre os resultados do SAFIR e o previsto pelo Eurocódigo 3. Para os elementos internos existe uma maior discrepância. Apesar disso, os resultados encontram-se acima daqueles obtidos com o EC3, encontrando-se assim em segurança, sendo o EC3 bastante conservativo para elementos deste tipo de aço inoxidável.

Para classes inferiores a 4, a curva obtida pelo EC3 não descreve uma curva perfeita, havendo uma “quebra” na passagem de Classe 3 para Classe 4.

4.5.2. Elementos sujeitos a flexão

Da Figura 21 à Figura 24 estão representados os resultados da resistência última de um elemento interno sujeito a flexão e a diferentes temperaturas.

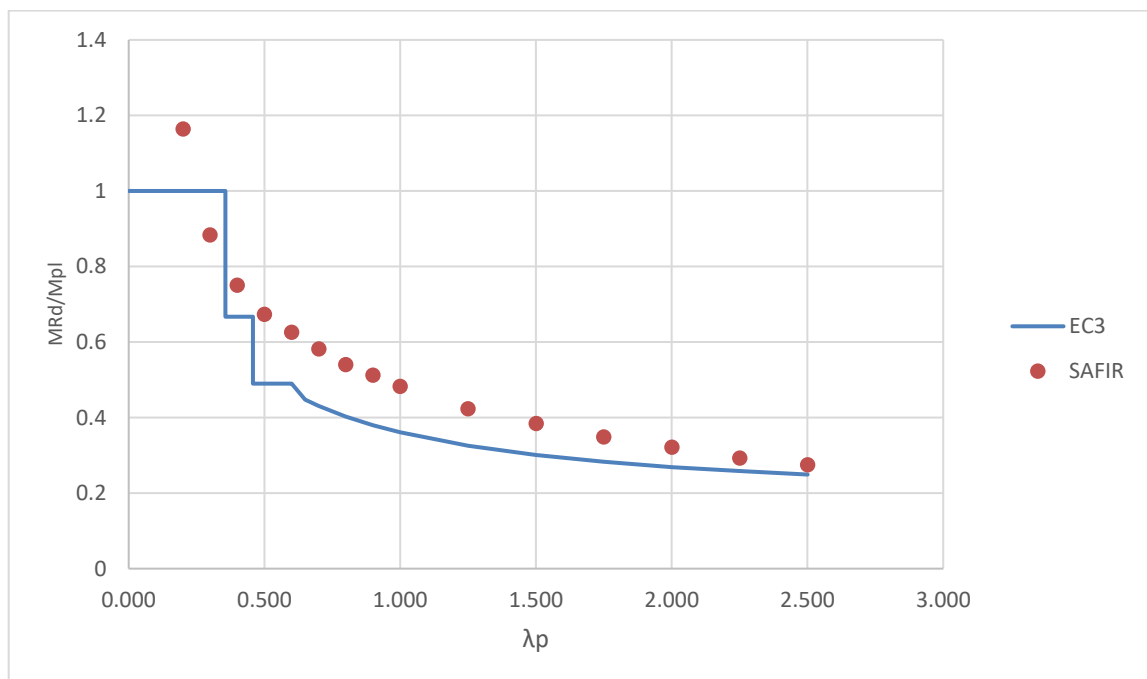


Figura 21 – Carga última de placas sujeitas a esforço de flexão a uma temperatura de 350°C.

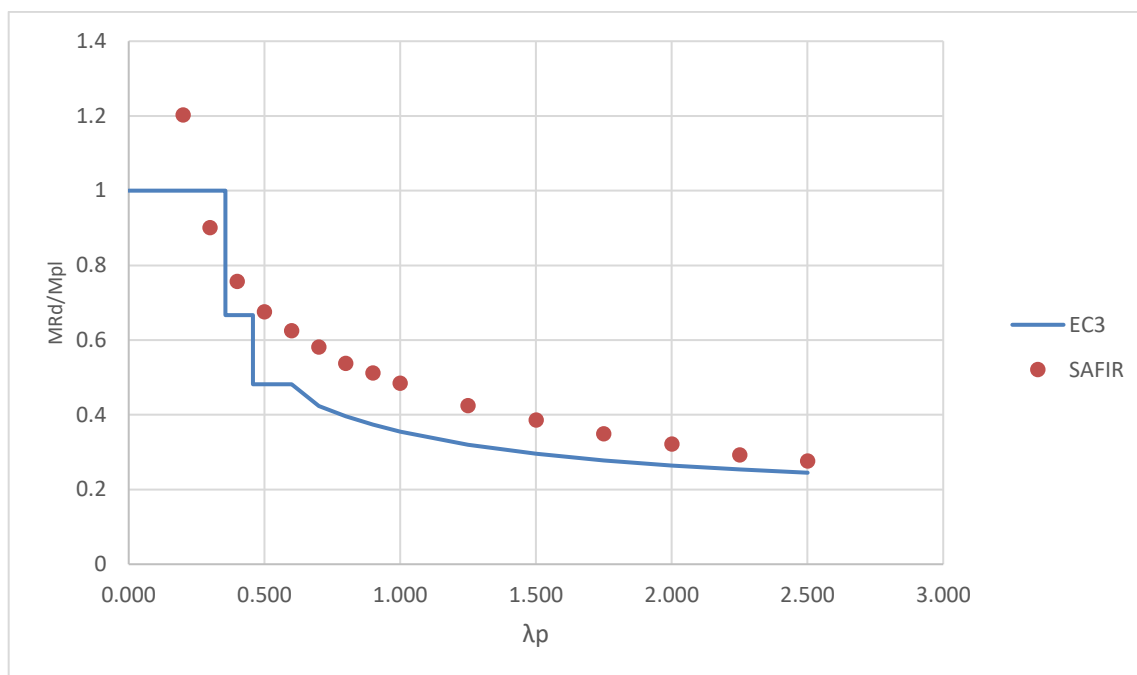


Figura 22 - Carga última de placas sujeitas a esforço de flexão a uma temperatura de 450°C.

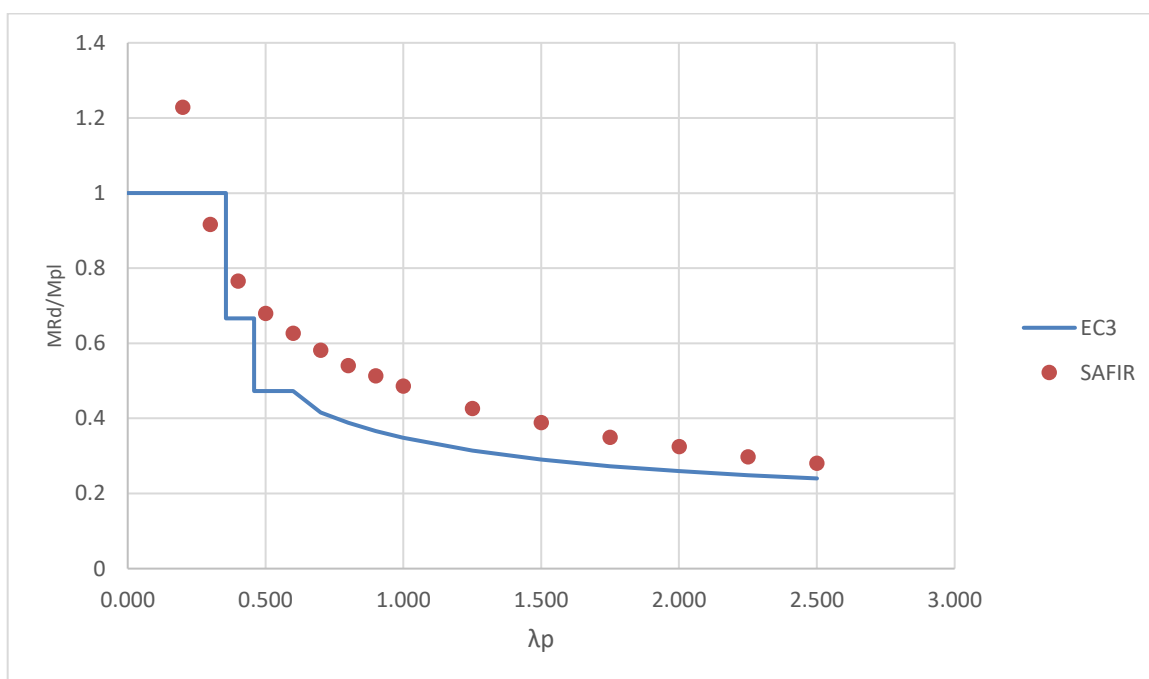


Figura 23 - Carga última de placas sujeitas a esforço de flexão a uma temperatura de 550°C.

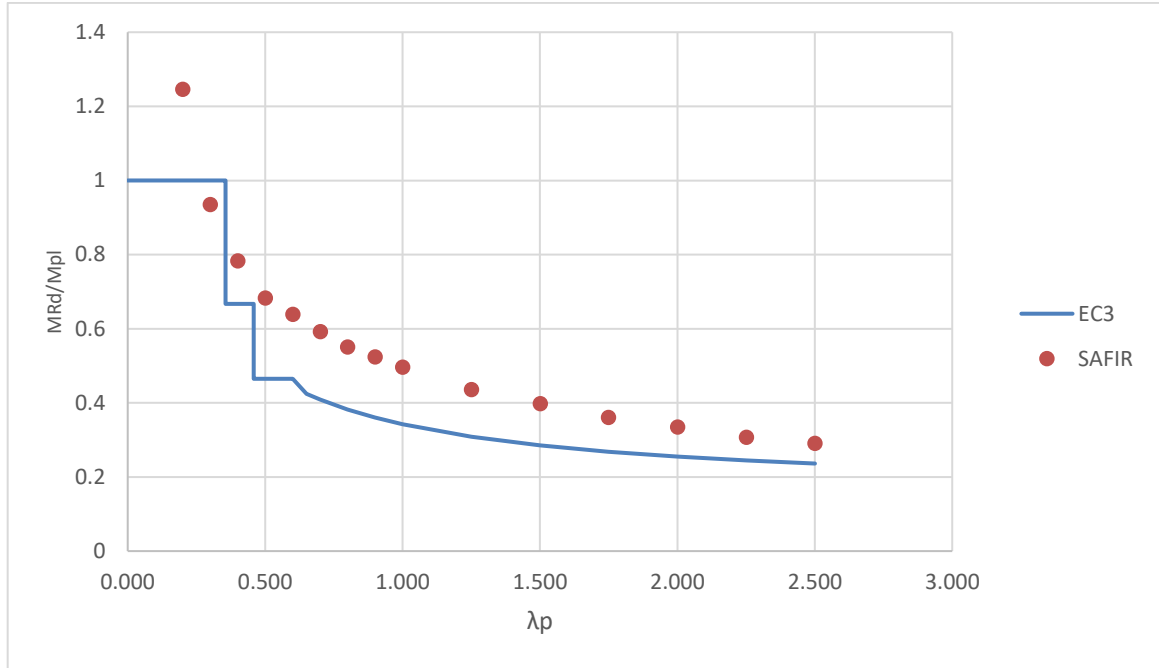


Figura 24 - Carga última de placas sujeitas a esforço de flexão a uma temperatura de 650°C.

A elevadas temperaturas a resistência à deformação para as diferentes classificações tendo em conta a deformação local, de acordo com o EC3, é definida por:

$$M_{Rd} = \begin{cases} M_{pl,fi,Rd} = W_{pl,t} K_{y,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} & \bar{\lambda}_p \leq 0.356 \\ M_{el,fi,Rd} = W_{el,y} K_{y,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} & 0.356 \leq \bar{\lambda}_p \leq 0.458 \\ M_{eff,fi,Rd} = W_{eff,y} K_{0.2p,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} & \bar{\lambda}_p > 0.458 \end{cases} \quad (24)$$

Onde $M_{pl,fi,Rd}$, $M_{el,fi,Rd}$ e $M_{eff,fi,Rd}$ representam a resistência à deformação plástica, resistência à deformação elástica e a resistência à deformação efetiva respetivamente para uma placa a elevada temperatura. $K_{y,\theta}$ e $K_{0.2p,\theta}$ são os fatores de redução obtidos na Parte 1-2 do Eurocódigo 3 para o aço a elevada temperatura, com o mostrado na Figura 5.

Pelos resultados da Figura 21 à Figura 24 pode ser observado que a curva definida pelo EC3 é bastante conservativa tendo em conta os resultados obtidos pelo SAFIR.

4.6. Proposta de Couto *et al*

Tendo em conta os resultados obtidos anteriormente, é notório que existe a necessidade da criação um novo método de forma a melhorar a curva obtida pelo EC3. Algumas propostas foram desenvolvidas recentemente com vista a solucionar esse problema, sendo a proposta de Couto *et al* (2015) é uma delas. Apesar de esta ser direccionada para secções de Classe 4 em aço carbono, foi realizada uma comparação entre a mesma e os resultados obtidos para placas em aço inoxidável.

Da Figura 25 à Figura 28 está representada uma comparação da carga última dos elementos internos e externos sujeitos a compressão obtidos através do SAFIR e uma comparação entre a previsão do EC3 e a proposta de Carlos *et al*.

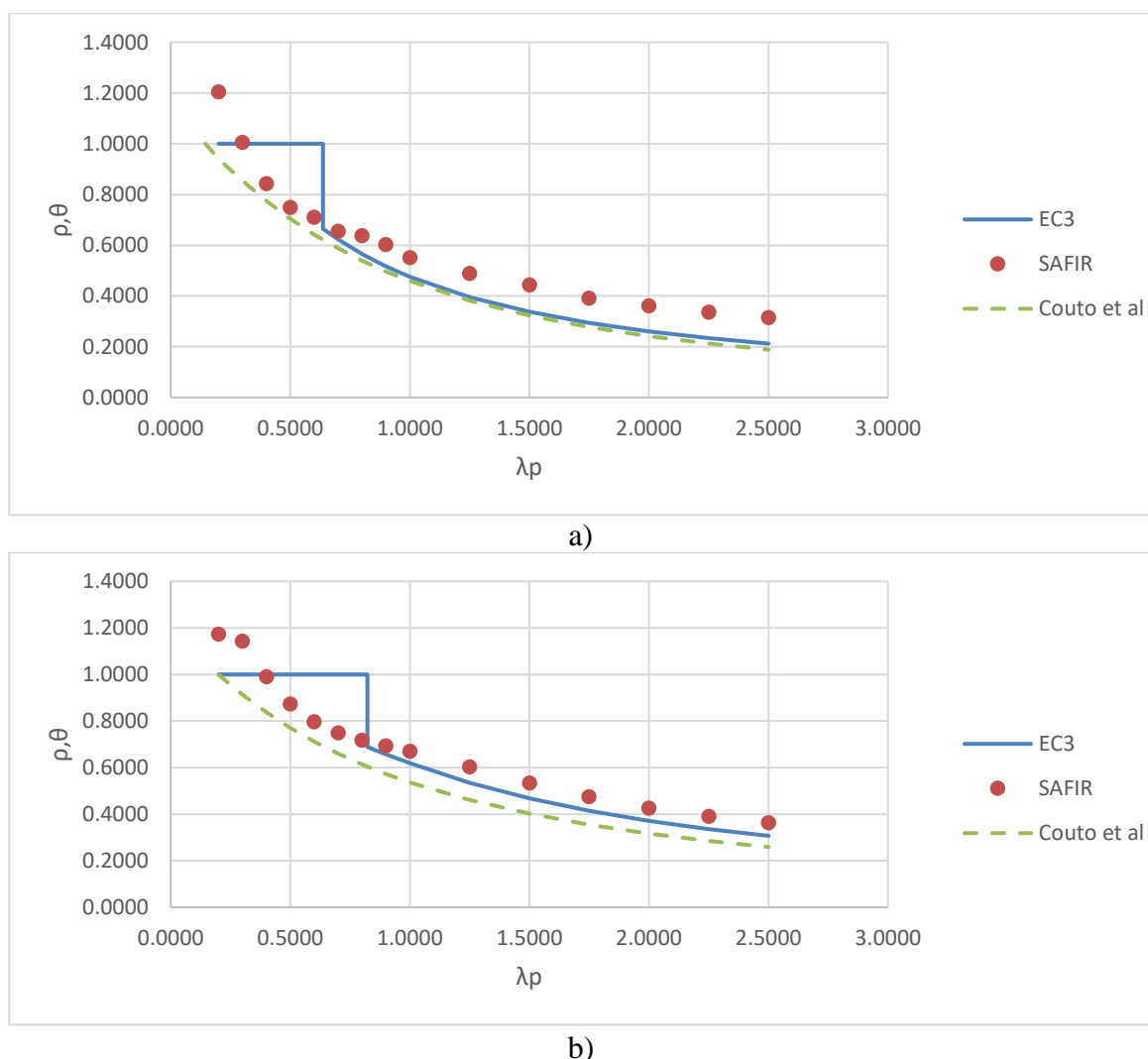
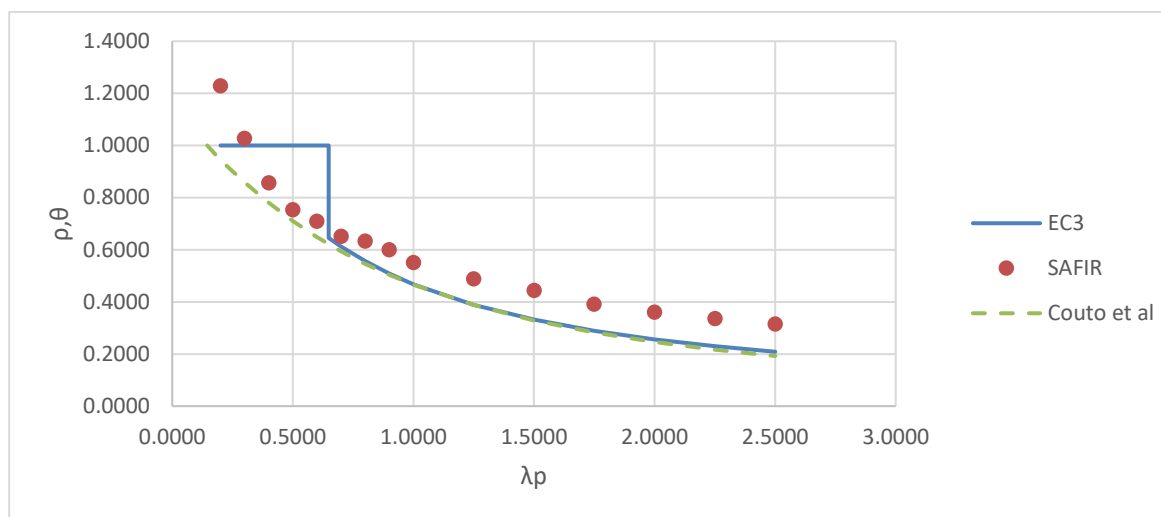
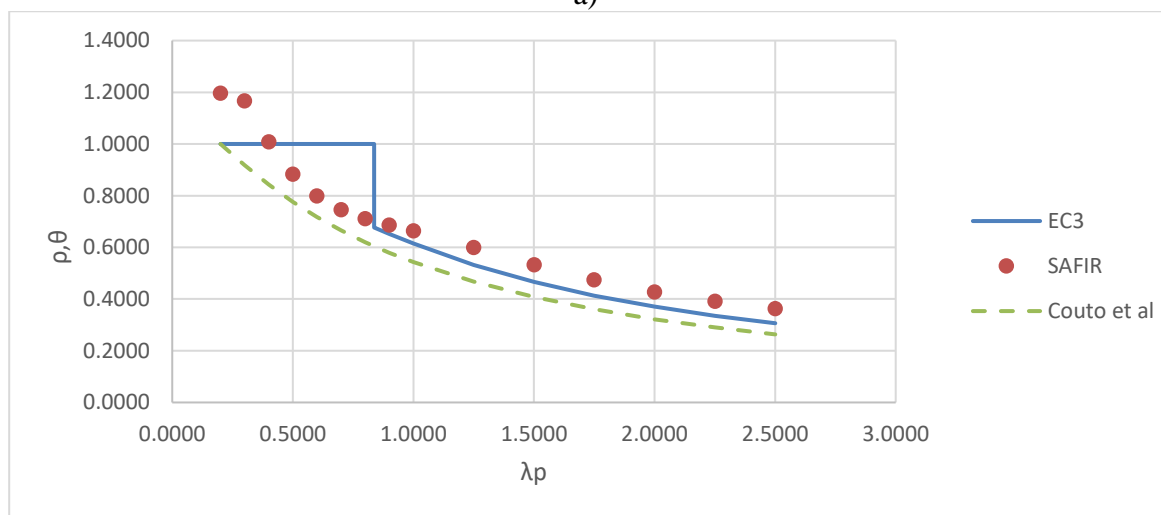


Figura 25 - Carga última de placas de elementos internos a) e salientes b) sujeitos a compressão a 350°C.

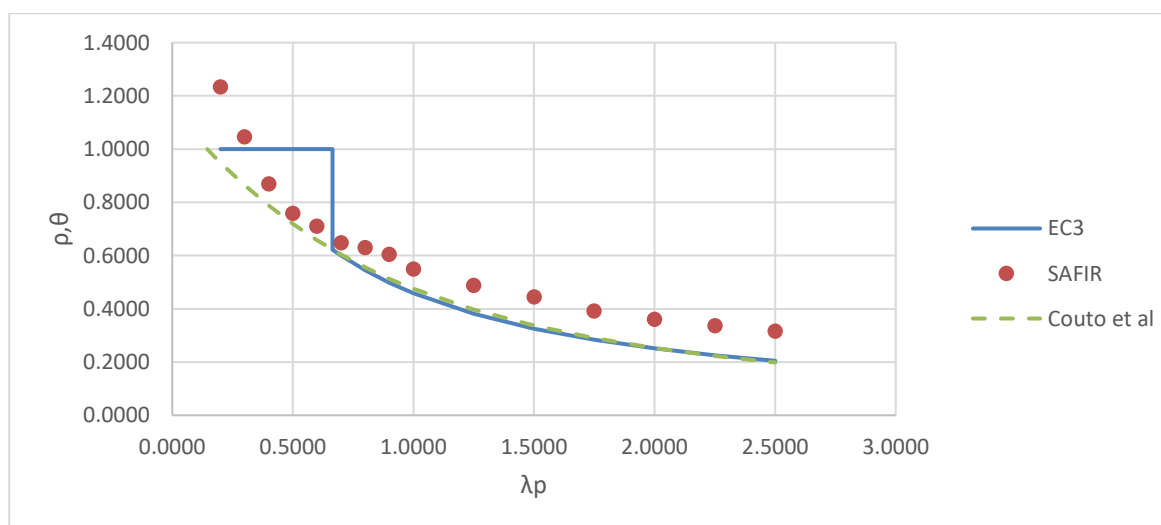


a)

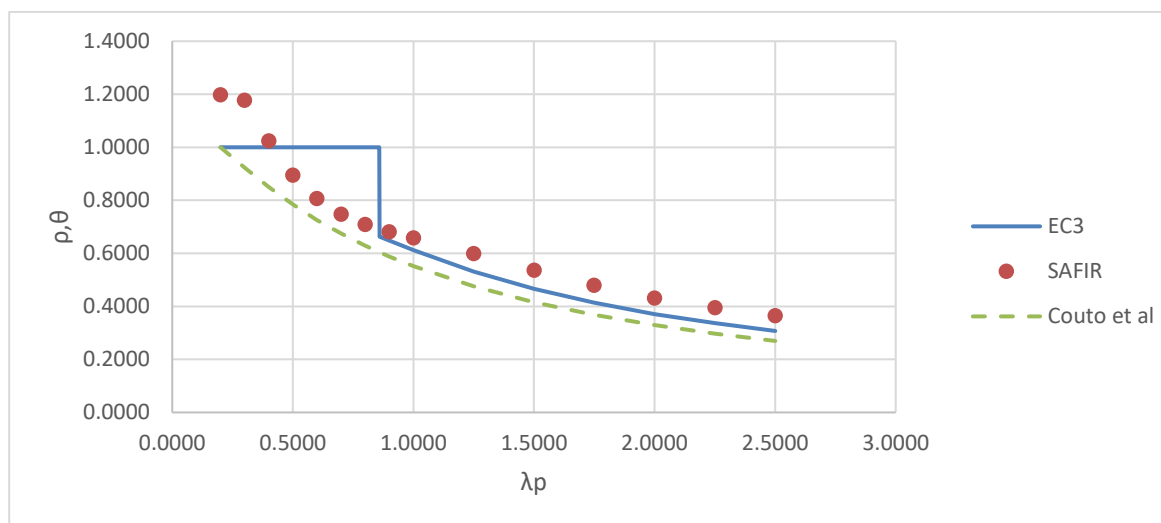


b)

Figura 26 - Carga última de placas de elementos internos a) e salientes b) sujeitos a compressão a 450°C.

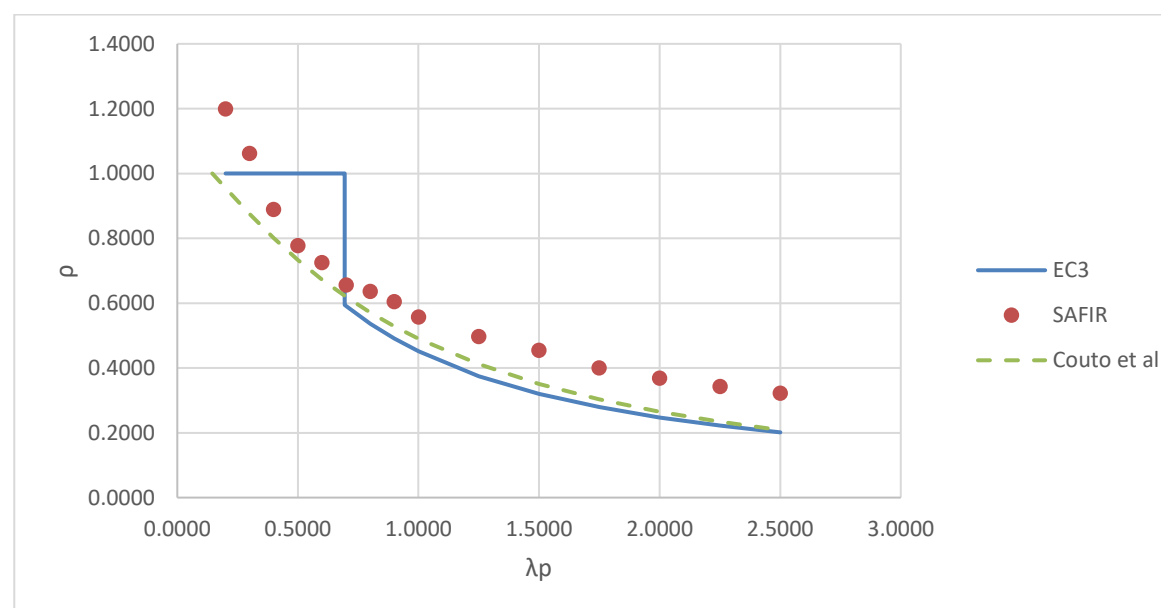


a)

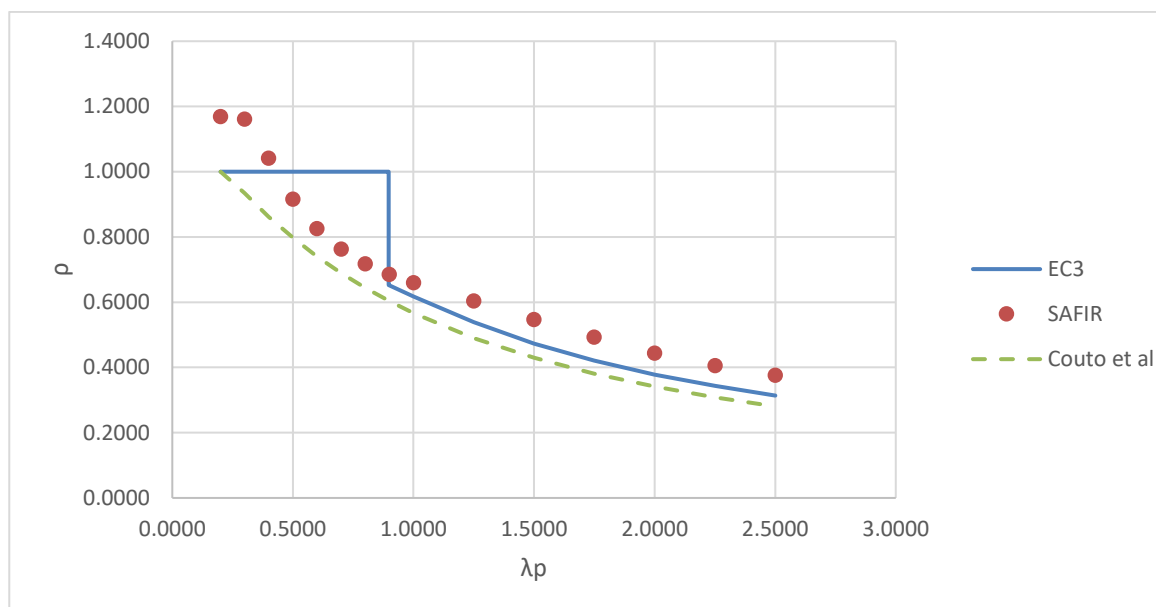


b)

Figura 27 - Carga última de placas de elementos internos a) e salientes b) sujeitos a compressão a 550°C.



a)



b)

Figura 28 - Carga última de placas de elementos internos a) e salientes b) sujeitos a compressão a 650°C.

Da Figura 29 à Figura 32 está representada uma comparação da carga última dos elementos internos sujeitos a flexão obtidos através do SAFIR e uma comparação entre a previsão do EC3 e a proposta de Couto *et al.*

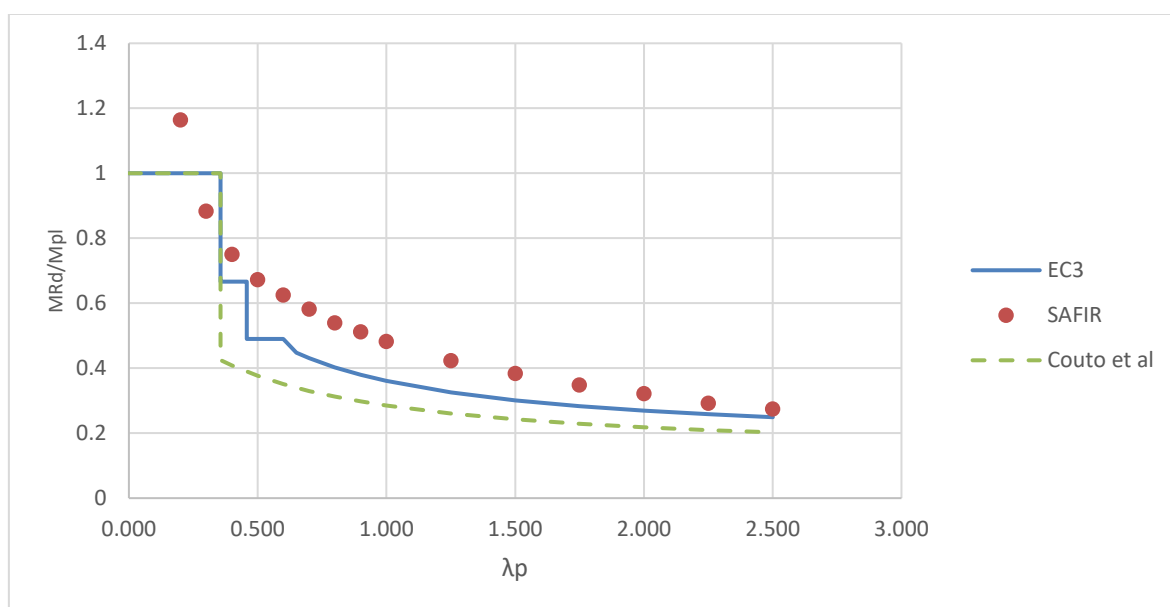


Figura 29 - Carga última de placas (elementos internos) sujeitos a flexão a 350°C.

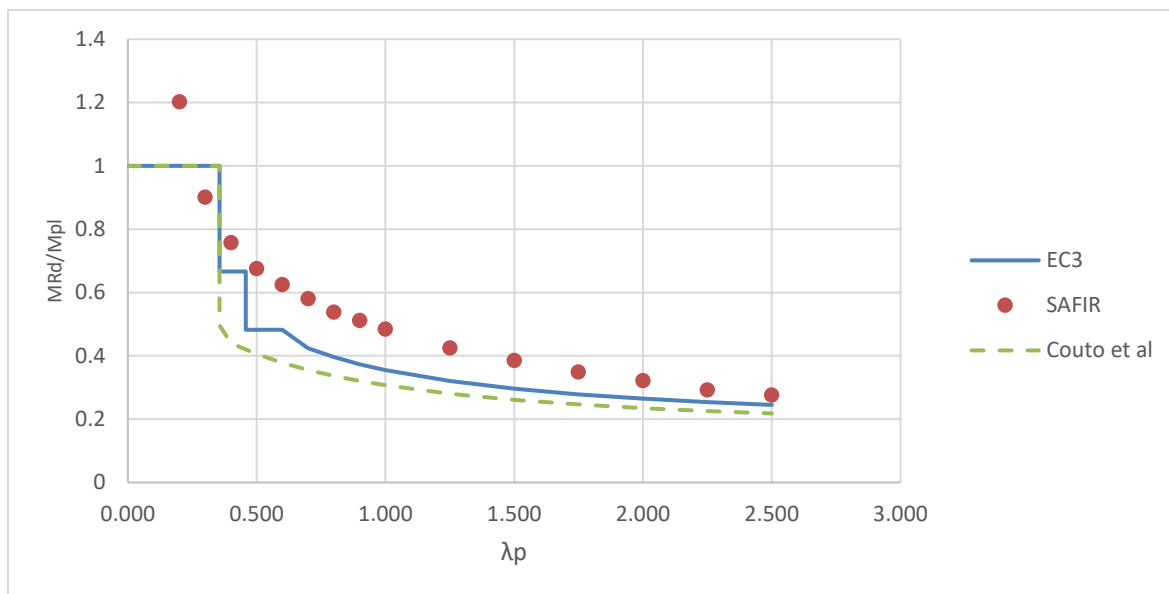


Figura 30 - Carga última de placas (elementos internos) sujeitos a flexão a 450°C.

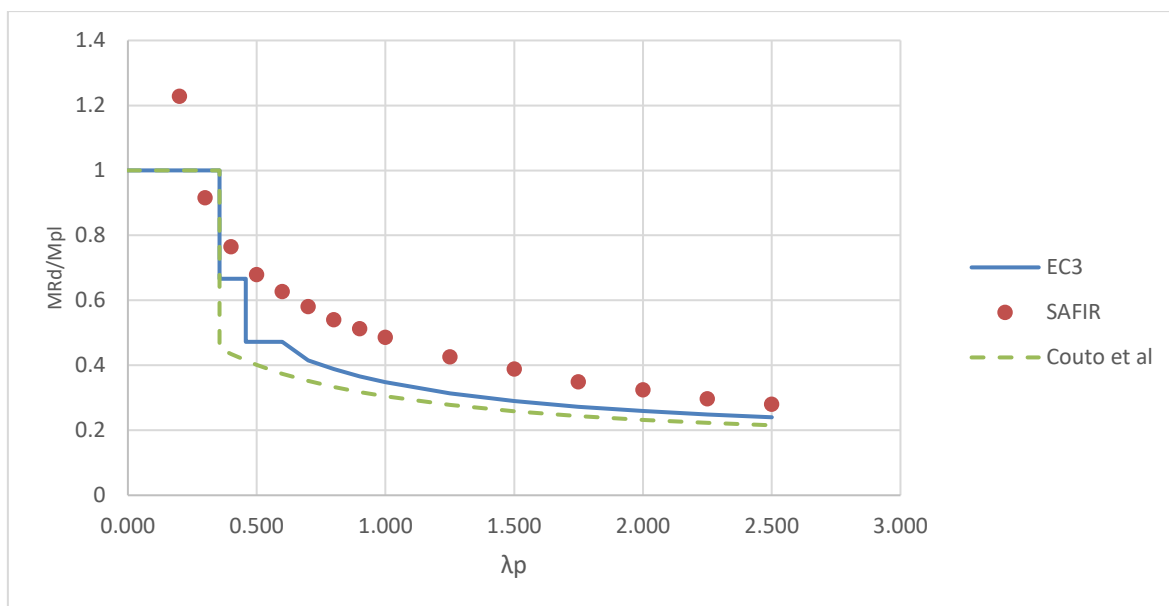


Figura 31 - Carga última de placas (elementos internos) sujeitos a flexão a 550°C.

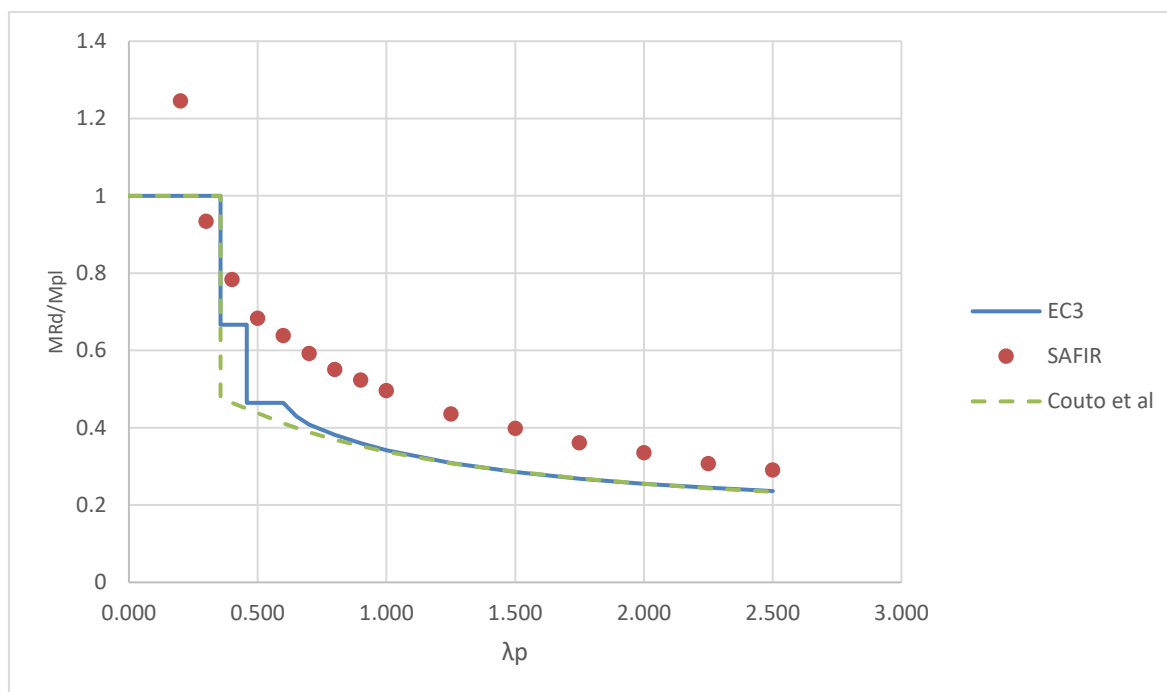


Figura 32 - Carga última de placas (elementos internos) sujeitos a flexão a 650°C.

Como se pode observar, a curva definida pela proposta de Couto *et al* acompanha melhor os resultados obtidos pelo SAFIR mas, tal como a curva do EC3 continua muito conservativa, uma das razões para isso é o facto de estar direccionada para o aço carbono.

Capítulo 5

5. RESISTÊNCIA DE SECÇÕES TRANSVERSAIS

5.1. Considerações gerais

As secções transversais esbeltas, quando sujeitas a esforços de compressão, são propensas a deformação local que impede a obtenção da tensão de cedência nas partes comprimidas da secção transversal afetando assim a sua resistência última. A temperatura normal, de acordo com o Eurocódigo 3 estas secções transversais são classificadas como Classe 4, sendo que a Parte 1-5 propõem, para ter em consideração a deformação local, o método da largura efetiva, que leva a uma diminuição da secção transversal com base na análise de placas feita na secção anterior.

A elevadas temperaturas, a Parte 1-2 do Eurocódigo 3 sugere, para secções de Classe 4, o uso de 350°C como a temperatura crítica, caso nenhum dimensionamento ao fogo for efetuado. Como alternativa, o anexo E da Parte 1-2 do EC3 sugere reduzir a secção transversal a partir do método da secção efetiva, usando as propriedades do aço a temperatura ambiente e para o dimensionamento da tensão de cedência do aço utilizar 0.2% do limite de elasticidade ($f_{0.2p,\theta}$).

Neste capítulo foi desenvolvido um estudo paramétrico, baseado na análise de elementos finitos, usando o programa SAFIR, de forma a determinar e comparar a resistência de várias secções transversais sujeitas a esforços de compressão e flexão.

Na Figura 33 podemos observar um exemplo de uma deformada de uma coluna, após a realização de um ensaio utilizando elevadas temperaturas, na Universidade de Liège.



Figura 33 - Exemplo da deformada de uma coluna sujeita a altas temperaturas na Universidade de Liège (FIDESC4, 2014).

5.2. Disposições de dimensionamento para a resistência das secções transversais esbeltas segundo o Eurocódigo 3

As secções transversais em forma de “I” e “H” podem ser consideradas como a junção de placas habitualmente mencionadas como elementos internos (almas) e elementos externos (banzos). Se a relação entre a largura e espessura (c/t) destas placas forem elevadas, então, estes elementos, são normalmente considerados como esbeltos, podendo se deformar quando sujeitos a forças de compressão impedindo assim alcançar a tensão de cedência prevista em uma ou mais partes da secção transversal, reduzindo assim a sua resistência. Para ter em conta este fenómeno, a secção transversal é classificada em função da relação entre a largura e a espessura das placas (3.3). De forma a considerar a deformação local é usado o método da largura efetiva (3.4).

A elevadas temperaturas a largura efetiva é calculada através do método da largura efetiva tal como a temperatura normal, ou seja, usando as propriedades dos materiais a temperatura normal e usando o valor de dimensionamento para a força de elasticidade de 0.2% ($f_{0.2p,\theta}$) em vez de 2% da tensão total ($f_{y,\theta}$), tal como normalmente é feito para o dimensionamento de outras classes. Estas recomendações são baseadas essencialmente no recente trabalho de Ranby, que demonstrou que esta metodologia é segura e leva a resultados precisos na determinação da carga última de placas finas suscetíveis a deformação local a elevadas temperaturas. O fator de redução a temperaturas elevadas é determinado segundo as equações (17) e (18). Na Figura 34 está representado um exemplo de deformação local e global de uma viga-coluna sujeita a elevadas temperaturas.



Figura 34 - Deformação local e global de uma viga-coluna testada a elevadas temperaturas num estudo efetuado na Universidade de Liège (FIDESC4, 2014).

5.3. Modelo numérico

O modelo de elementos finitos foi implementado usando o programa SAFIR. Os elementos estruturais foram discretizados em elementos de casca com quatro nós e seis graus de liberdade (3 translações e 3 rotações). A temperatura foi considerada uniforme ao longo de toda a secção transversal para que uma comparação entre os resultados numéricos e as equações do EC3 fosse possível. A resistência da secção transversal a elevadas temperaturas foi determinada aumentando a temperatura para o valor desejado e depois aplicando um aumento na carga até se alcançar o colapso. As temperaturas a estudar, são, para além da temperatura ambiente (20°C), 350°C, 450°C, 550°C e 650°C. O comprimento dos elementos

será de 10 vezes a altura da alma. O modelo numérico foi validado num estudo anterior realizado por Couto C. *et al* em 2014.

Na Figura 35 está ilustrado um exemplo do modelo numérico utilizado neste estudo.

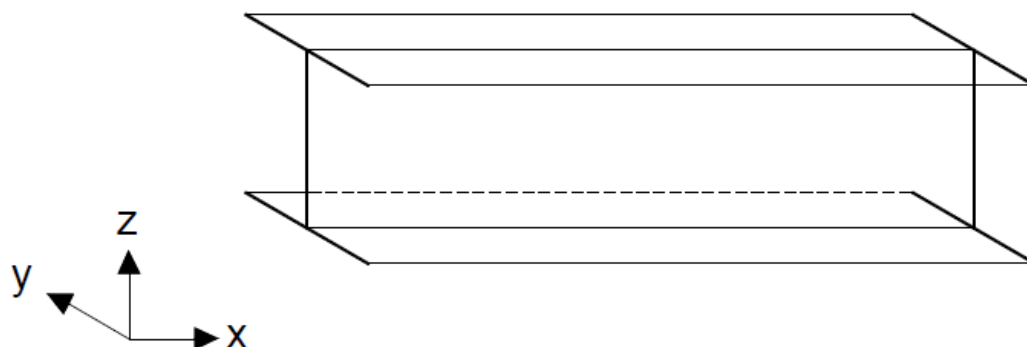


Figura 35 - Ilustração do modelo numérico, Couto (2015).

As cargas foram distribuídas ao longo dos banzos e da alma como ilustrado na Figura 36. De forma a evitar problemas numéricos foi adicionada uma camada adicional com maior espessura nas extremidades do elemento estrutural onde foram aplicadas as cargas.

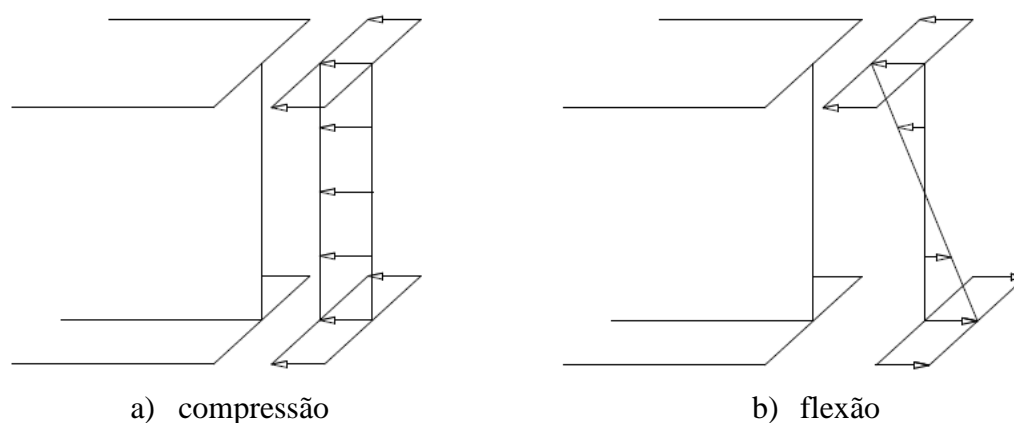


Figura 36 - Modelação das cargas, Couto (2015).

Em termos de imperfeições geométricas, foram seguidas as recomendações dadas pela Parte 1-5 do EC3. As imperfeições geométricas foram introduzidas ao modelo alterando a escala do primeiro ponto nodal com uma amplitude correspondente de 80% da tolerância de

fabricação geométrica dada pela EN 1090-2. Consequentemente, a amplitude foi considerada como $b/100$, onde b é a altura da alma ou o comprimento do banzo, dependendo da localização do nó mais deslocado. Para ambos os modelos, as tensões residuais não foram consideradas porque os seus efeitos a elevadas temperaturas podem ser desprezáveis para a determinação da resistência última (Couto C. *et al*, 2014).

5.4. Secções transversais estudadas

Neste capítulo é descrito as dimensões e classificações das secções transversais usadas neste estudo numérico. Foram estudados um total de 7 secções transversais sujeitas a compressão e 7 secções transversais sujeitas a flexão sob o eixo principal.

Na Tabela 12 e Tabela 13 estão indicadas as diferentes combinações de secções transversais usadas neste estudo paramétrico quando sujeitas à compressão e à flexão.

Tabela 12 - Dimensões em milímetros e classe dos perfis a estudar à compressão.

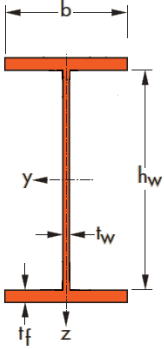
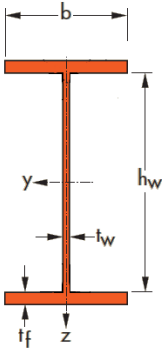
Alma			Banzo			Perfil
h_w	t_w	Classe	b	t_f	Classe	
250	6	C4	200	8	C4	
150	5	C4	135	8	C2	
165	5	C4	165	8	C4	
115	8	C1	135	12	C1	
115	5	C2	135	8	C2	
120	5	C3	145	8	C3	
140	5	C4	145	8	C3	

Tabela 13 - Dimensões em milímetros e classe dos perfis a estudar à flexão.

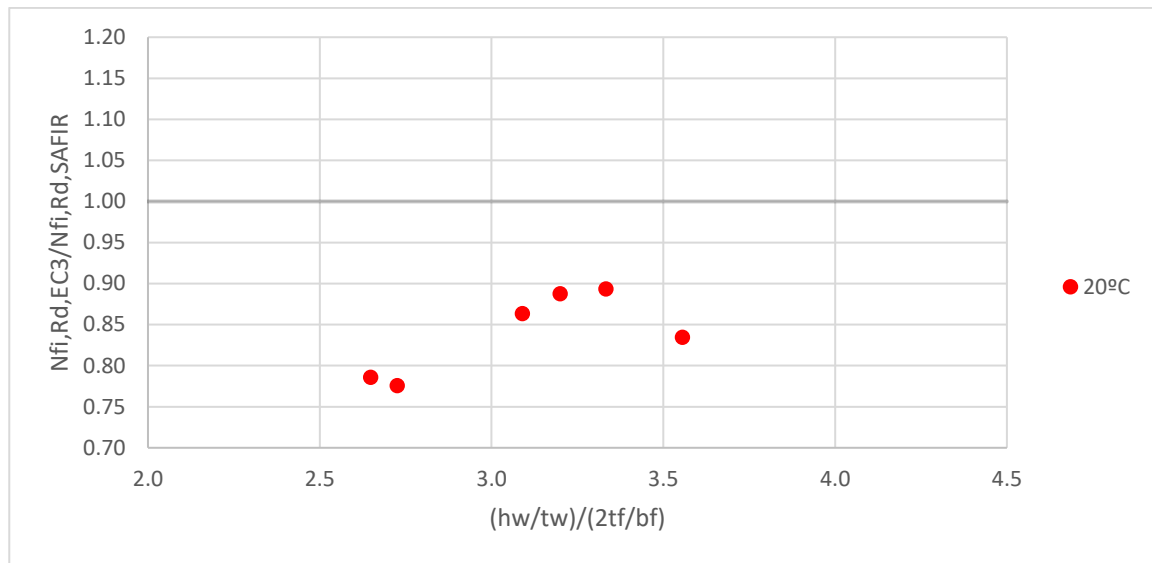
Alma			Banzo			Perfil
h_w	t_w	Classe	b	t_f	Classe	
516	5	C4	255	8	C4	
416	5	C4	200	8	C4	
416	5	C4	135	8	C2	
416	12	C1	135	8	C1	
250	5	C2	135	8	C2	
416	8	C3	150	8	C3	
336	5	C4	150	8	C3	

5.5. Resultados numéricos e comparação com o EC3

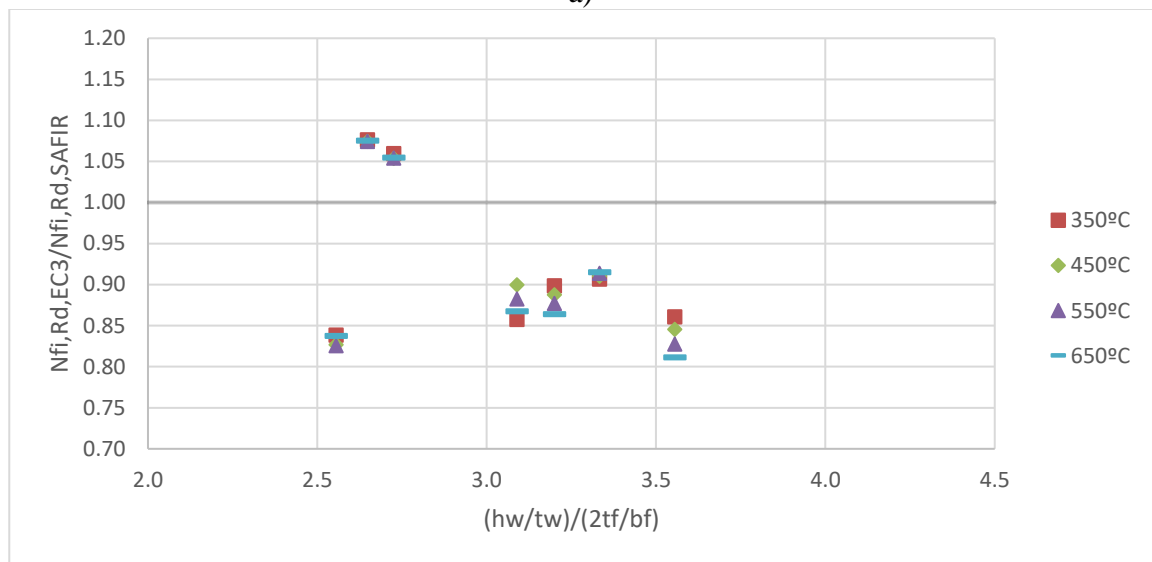
Neste capítulo, os resultados obtidos da resistência das secções transversais através da análise de elementos finitos (SAFIR) são comparados com os métodos indicados no Eurocódigo 3 para elementos sujeitos a compressão e flexão.

5.5.1. Elementos sujeitos a compressão

Na Figura 37, os resultados obtidos com recurso do SAFIR são comparados com os métodos de dimensionamento da EN1993-1-2, através da relação entre a resistência obtida pela SAFIR ($N_{fi,Rd,SAFIR}$) e os métodos da EN1993-1-2 ($N_{fi,Rd,EC3}$) calculados de acordo com as equações dadas no capítulo 3.5. Quando o valor desta relação for superior a 1, significa que a resistência prevista pela EN1993-1-2 é maior que aquela obtida com a AEF, ou seja, os resultados são inseguros. Quando o valor da relação é inferior a 1, então os resultados são seguros.



a)



b)

Figura 37 - Resistência das secções transversais sujeitas a esforço de compressão a temperatura normal a) e a elevadas temperaturas b).

Os valores obtidos apresentam uma média de 0,902 e um desvio padrão de 0,103.

Podemos verificar pela Figura 37 que os elementos apresentam um comportamento semelhante estando em zona de segurança, com exceção das secções transversais de Classe 2 e 3, em que, quando sujeitas a altas temperaturas apresentam-se na zona insegura. No geral, os resultados obtidos pelo EC3 são bastante conservativos ficando demonstrado que a metodologia dada pelo Eurocódigo 3 pode ser melhorada.

Da Figura 38 à Figura 39 estão representadas as deformadas de dois perfis sujeitos a compressão e a uma elevada temperatura.

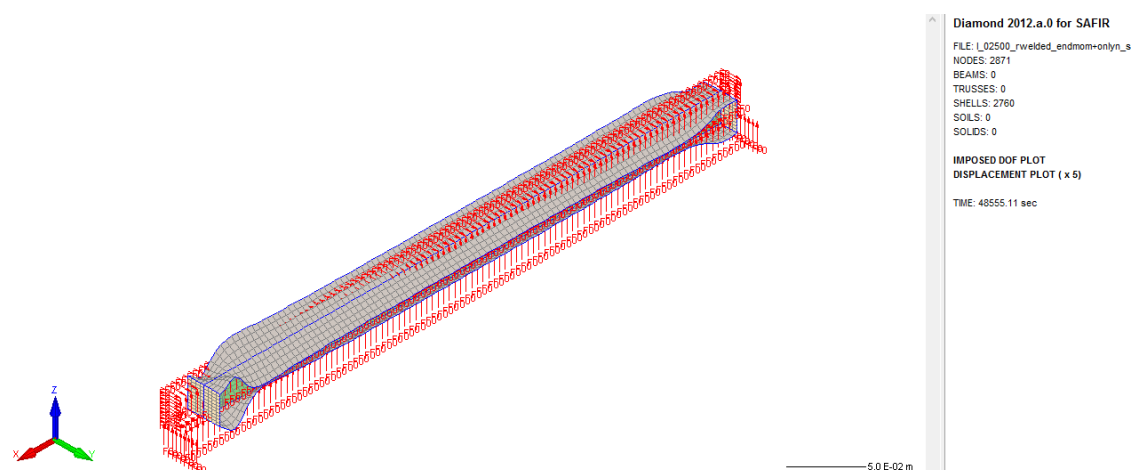


Figura 38 - Forma da deformada (x5) durante o colapso de uma secção transversal de Classe 3 sujeita a compressão a uma temperatura 350°C.

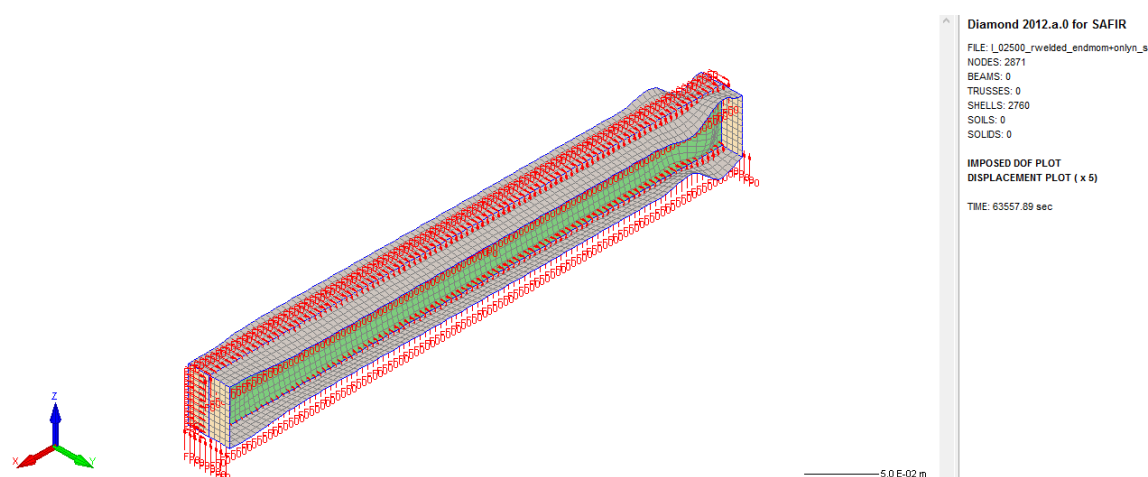


Figura 39 - Forma da deformada (x5) durante o colapso de uma secção transversal de Classe 4 sujeita a compressão a uma temperatura 350°C.

5.5.2. Elementos sujeitos a flexão

Na Figura 40, os resultados obtidos com recurso do SAFIR são comparados com os métodos de dimensionamento da EN1993-1-2, através da relação entre a resistência obtida pelo SAFIR ($M_{fi,Rd,SAFIR}$) e os métodos da EN1993-1-2 ($M_{fi,Rd,EC3}$) calculados de acordo com as equações dadas no capítulo 3.5. Quando o valor desta relação for superior a 1, significa que a resistência prevista pela EN1993-1-2 é maior que aquela obtida com a SAFIR, ou seja, os

resultados são inseguros. Quando o valor da relação é inferior a 1, então os resultados são considerados seguros.

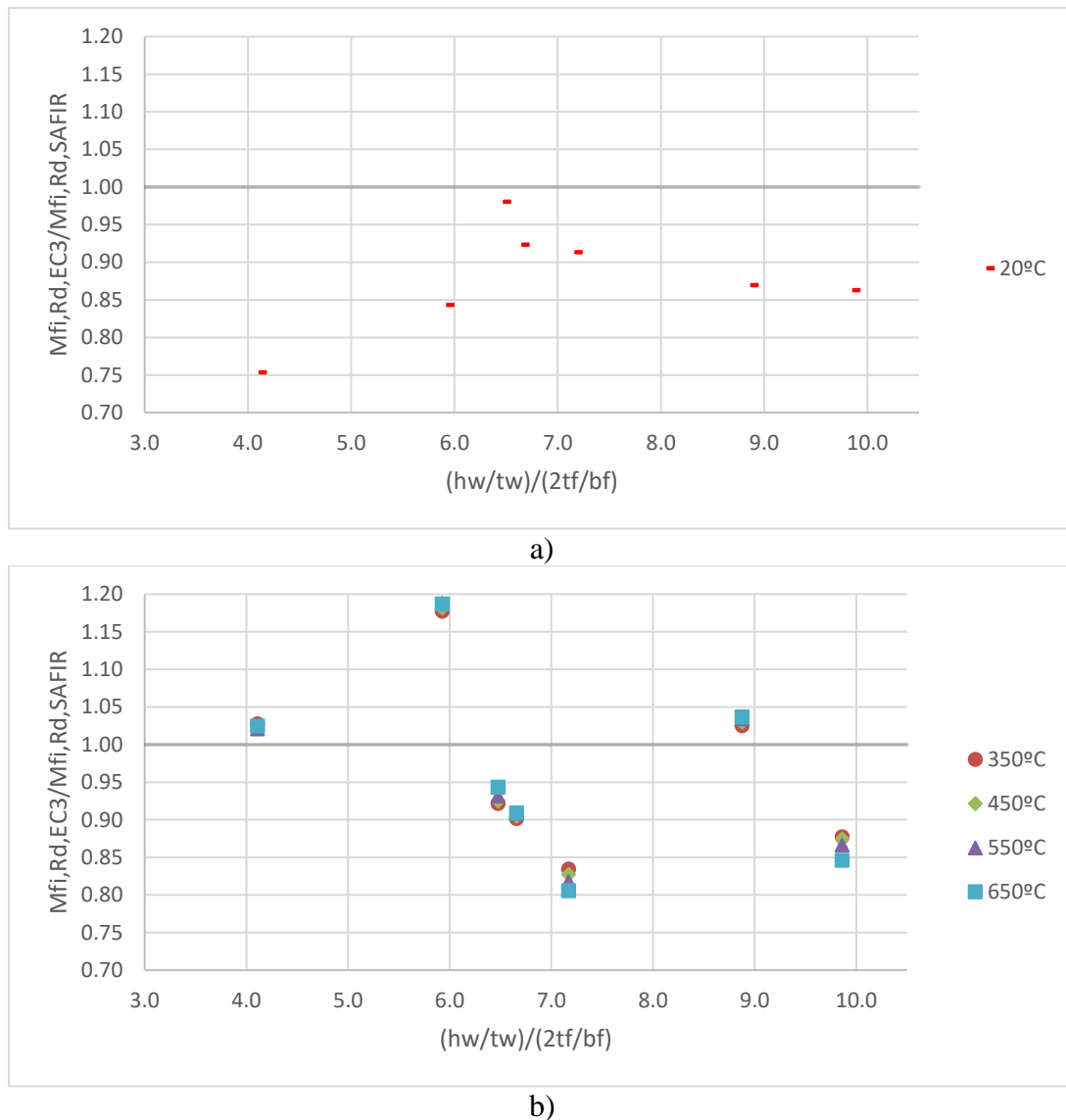


Figura 40 - Resistência das secções transversais sujeitas a esforço de flexão a temperatura normal a) e a elevadas temperaturas b).

Os valores obtidos apresentam uma média de 0,948 e um desvio padrão de 0,113.

Podemos verificar pela Figura 40 que os elementos apresentam um comportamento semelhante estando em zona de segurança, com exceção das secções transversais de Classe 1, 2 e 3, em que, quando sujeitas a altas temperaturas apresentam-se na zona insegura. No geral, os resultados obtidos pelo EC3 são bastante conservativos ficando demonstrado que a metodologia dada pelo Eurocódigo 3 pode ser melhorada.

Na Figura 41 e Figura 42 estão representadas as deformadas de dois perfis sujeitos a esforço de flexão e a uma elevada temperatura.

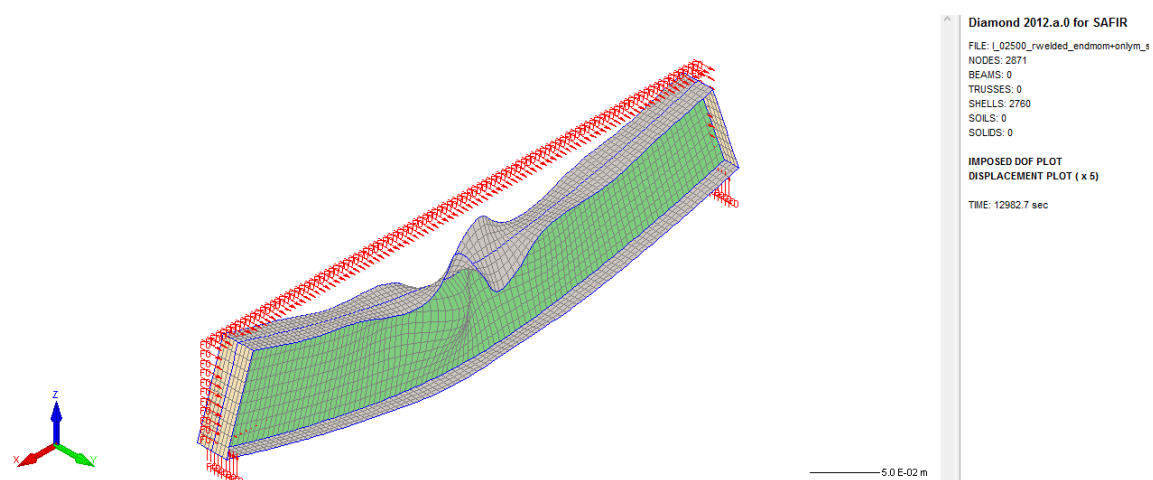


Figura 41 - Forma da deformada (x5) durante o colapso de uma secção transversal de Classe 3 sujeita a flexão a uma temperatura de 350°C.

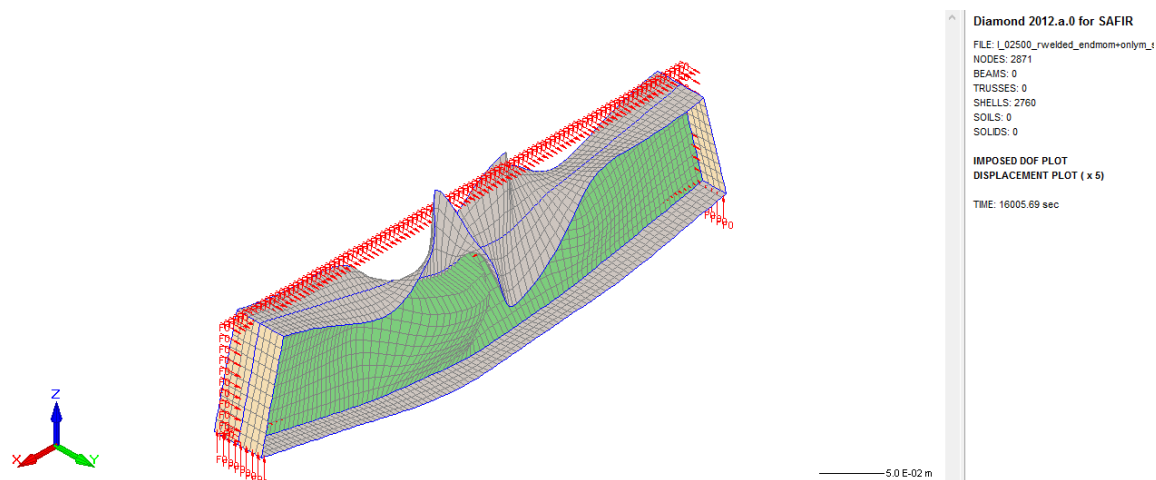


Figura 42 - Forma da deformada (x5) durante o colapso de uma secção transversal de Classe 4 sujeita a flexão a uma temperatura de 350°C.

5.6. Proposta de Couto *et al*

Tal como no capítulo de estudo das placas, foi também feita uma comparação com a proposta de Couto *et al* em secções transversais sujeitas a elevadas temperaturas.

5.6.1. Elementos sujeitos a compressão

Na Figura 43, os resultados obtidos com recurso do SAFIR são comparados com a proposta de Couto *et al*, através da relação entre a resistência obtida pelo SAFIR ($M_{fi,Rd,SAFIR}$) e a nova proposta de Couto *et al* ($M_{fi,Rd,Couto}$) calculados de acordo com as equações dadas no capítulo 4.6.

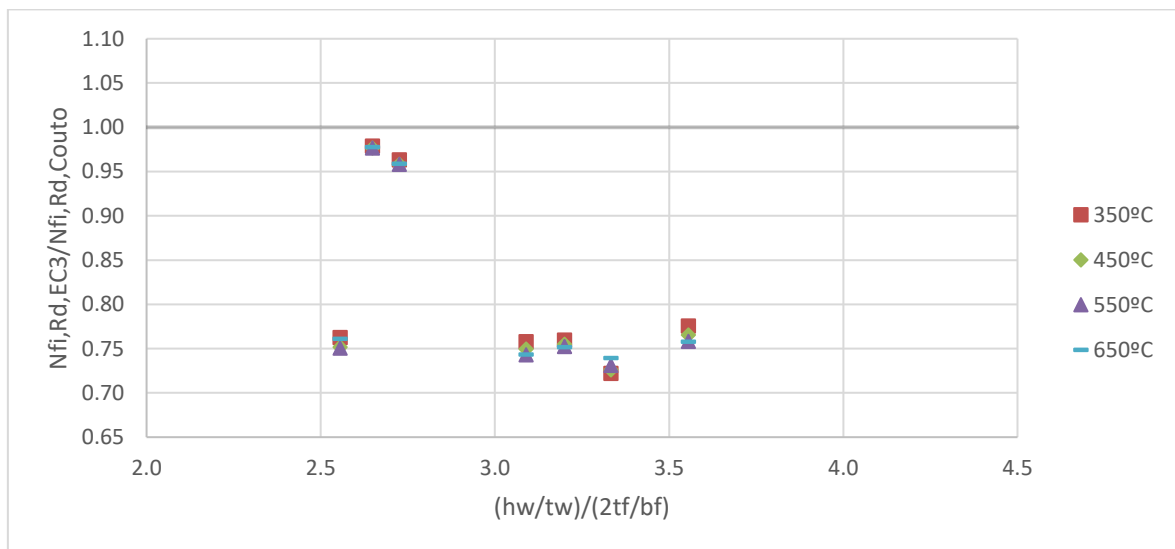


Figura 43 - Resistência das secções transversais sujeitas a esforço de compressão a elevadas temperaturas

Os valores obtidos apresentam uma média de 0,813 e um desvio padrão de 0,101.

5.6.2. Elementos sujeitos a flexão

Na Figura 44, os resultados obtidos com recurso do SAFIR são comparados com a proposta de Couto *et al*, através da relação entre a resistência obtida pelo SAFIR ($M_{fi,Rd,SAFIR}$) e a nova proposta de Couto *et al* ($M_{fi,Rd,Couto}$) calculados de acordo com as equações dadas no capítulo 4.6.

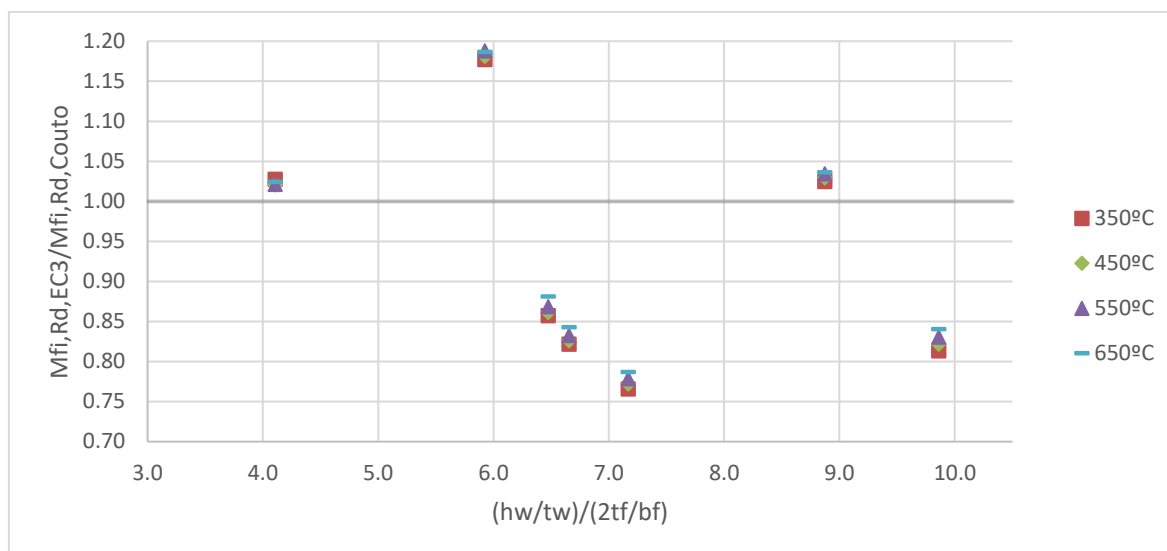


Figura 44 - Resistência das secções transversais sujeitas a esforço de flexão a elevadas temperaturas.

Os valores obtidos apresentam uma média de 0,934 e um desvio padrão de 0,140.

Podemos verificar pela Figura 43 e Figura 44 que o comportamento dos elementos obtidos com a proposta de Couto *et al* é um pouco mais conservativa em comparação com os resultados obtidos segundo o Eurocódigo 3, isto pode dever-se ao facto de esta proposta estar dirigida a elementos em aço carbono.

Capítulo 6

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusões

Ao longo do presente trabalho desenvolveu-se um estudo numérico paramétrico sobre o comportamento de vigas e pilares restringidos de diferentes classes em aço inoxidável com secções transversais em “I” e “H” em situação de incêndio. Nesse sentido, foi realizada uma comparação entre as cargas últimas obtidas com o programa de elementos finitos SAFIR e as diferentes metodologias de verificação de segurança nomeadamente os requisitos previstos na EN 1993-1-2.

Foi analisado o comportamento a elevadas temperaturas de placas finas em aço inoxidável. A influência da deformação local na determinação da resistência última destas mesmas placas foi estudada recorrendo a uma análise de elementos finitos.

À temperatura normal, concluiu-se que os resultados numéricos obtidos através desse estudo estão em concordância com os resultados determinados usando a metodologia do EC3.

Em situação de incêndio, para os elementos salientes observou-se que, a elevadas temperaturas e para elementos de Classe 4, os resultados do modelo SAFIR aproximavam-se dos resultados previstos pelo Eurocódigo 3. Contrariamente, para os elementos internos verificou-se uma maior discrepância entre resultados. Neste caso, os valores estimados pelo modelo mostram-se acima dos valores obtidos com o EC3, apesar de se encontrar do lado da segurança, pode ser demasiado conservativo no que toca ao dimensionamento de elementos com aço inoxidável.

Para classes inferiores a 4, a curva obtida pelo EC3 não descreve uma curva perfeita, havendo uma “quebra” devido à passagem de Classe 3 para Classe 4 havendo por isso uma certa imprecisão no dimensionamento de elementos com uma esbelteza próxima desta passagem de classes.

Foi feito também um estudo paramétrico a secções transversais, baseado na análise de elementos finitos, de forma a determinar e comparar a resistência de várias secções transversais sujeitas a esforços de compressão e flexão. Por análise dos resultados concluiu-se que a metodologia apresentada no EC3 para o cálculo da resistência conduz a resultados

simultaneamente conservativos e inseguros quando comparados com os resultados numéricos obtidos pelo SAFIR. Possíveis razões que justifiquem esta diferença nos resultados poderão estar relacionadas com o facto de o efeito da temperatura, na deformação local a elevadas temperaturas, não estar a ser corretamente tido em conta no cálculo das propriedades efetivas determinadas com base nas propriedades do material a temperatura normal. Outro motivo pode dever-se ao facto de a deformação local ocorrer antes do espectável, especialmente para uma secção de Classe 3. Por fim, o facto de se considerar, para secções de Classe 4, o limite de elasticidade de 0.2% para o dimensionamento da tensão de cedência em toda a secção transversal pode ser restritivo caso essa mesma secção seja constituída por elementos de Classe diferente de 4.

A proposta de Couto *et al* (2015) melhora significativamente a curva obtida, mas, devido a ser direccionada para o aço carbono acaba também por ser bastante conservativa.

Em resumo, a precisão das formulas de dimensionamento ao fogo dadas pelo Anexo E da Parte 1-2 do Eurocódigo 3 para elementos com secção transversal de Classe 4 foram estudadas, tendo-se verificado que a metodologia proposta pelo EC3 produz resultados imprecisos em situação de incêndio. A metodologia atual do EC3 subestima a resistência das secções transversais principalmente porque não considera a resistência adicional fornecida pelas placas que não são de Classe 4.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho, alguns aspetos relacionados com o comportamento ao fogo de aço inoxidável não foram alvo de análise, pelo que nesta secção se recomendam como futuras linhas de investigação.

Uma vez que todos os resultados numéricos foram obtidos para a classe de aço inoxidável 1.4301, seria pertinente alargar o estudo para outras classes de aço como por exemplo o aço ferrítico do tipo 1.4003, o aço austenítico-ferrítico do tipo 1.4462 e aços austeníticos do tipo 1.4571 e 1.4401.

De igual forma, neste trabalho foi apenas estudado o comportamento de vigas e colunas com secções transversais em “I” e “H”, pelo que se adequaria o desenvolvimento de análises a

outros tipos de secções transversais, variando as condições de apoio dos elementos estruturais e forma de distribuição das cargas.

Finalmente, esta dissertação é inteiramente apoiada em estudos computacionais com base em métodos de elementos finitos que, apesar de validados, podem nem sempre reproduzir fielmente o comportamento da estrutura principalmente pela variabilidade de alguns fatores que afetam o comportamento estrutural, como é o caso das imperfeições. Assim, estudos baseados em testes experimentais deverão ser desenvolvidos por forma a melhor compreender o comportamento real da estrutura, comparando com os resultados obtidos através de simulações numéricas, metodologias do EC3 e outras propostas.

Referências

Bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baptista, A. M. R. (2014). “*Verificação de segurança de perfis de aço enformado a frio com secção em C*”. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2005a). “EN 1993–1–1, Eurocode : Design of Steel Structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings”, Bruxelas, Bélgica.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2005b). “EN 1993–1–2, Eurocode : Design of Steel Structures – Part 1–2: General rules and rules for buildings”, Bruxelas, Bélgica.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2005c). “EN 10088-2, Stainless steels – Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes”. Bruxelas, Bélgica.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2005d). “EN 1090-2, Execution of Steel and aluminium Structures - Part 2: Technical Requirements for the execution of steel structures”. Bruxelas, Bélgica.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2006a). “EN 1993-1-4, Eurocode 3 : Design of steel structures – Part 1-4: General rules – Supplementary Rules for Stainless steels”. Bruxelas, Bélgica.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2006b). “EN 1993–1–5, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1–5: Plated structural elements”. Bruxelas, Bélgica.

Couto C., Vila Real P., Lopes N., Zhao B. (2014), “Effective width method to account for the local buckling of steel thin plates at elevated temperatures”, *Thin-Walled Structures*, vol. 84, pp. 134-149.

Couto, C; Vila Real, P. M. M.; Lopes, N. (2013a). “RUBY an interface software for running a buckling analysis of SAFIR models using Cast3M”. Universidade Aveiro

Couto, C.; Vila Real, P. M. M.; Lopes, N.; Zhao, B (2013b). “Novas expressões para o cálculo da secção efectiva de secções transversais metálicas de Classe 4 a altas temperaturas”. IX Congresso de Construção Metálica e Mista, Porto.

Couto, C. (2015). “*Fire design of steel members with class 4 cross-section*”. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.

Estrada, I.; Real, E.; Mirambell, E. (2007). “General behaviour and effect of rigid and non-rigid end post in stainless steel plate girders loaded in shear. Part I: Experimental study”. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol 63, nº 7, p. 970-984.

Euro Inox, SCI, Steel Construction Institute (2006). “Design Manual for Structural Stainless Steel”, 3rd edition.

ESDEP, European Steel Design Education Programme (2000). “*Programa Europeo de Formación en el Cálculo y Diseño de la Construcción en Acero*” (in Spanish). Instituto Técnico de la Estructura en Acero (IETA).

FIDESC4 (2014), “Fire Design of Steel Members with Welded or Hot-Rolled Class 4 Cross-Section, RFCS-CT-2011-2014, Techinal Report No. 5”.

Franssen, J.M. (2011). “User’s manual for SAFIR 2011, a computer program for analysis of structures subjected to fire”. Structural Engineering, ArGEnCO, University of Liege, Belgium.

Franssen J.-M., Vila Real P., *Fire design of steel structures*. ECCS: Ernst & Sohn, 2010.

Gardner, L. (2005). “*The use of stainless steel in structures*”. *Progress in Structural Engineering and Materials*;7(2): 45-55.

Gamelas, P. (2014). “*Vigas em aço inoxidável com secções em I de classe 4 ao fogo*”. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.

International Molybdenum Association (IMOA). Consultado em: Novembro de 2016. Disponível em: <http://www.imoa.info/>

Knobloch M., Fontana M. (2006), “Strain-based approach to local buckling of steel sections subjected to fire”, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 62, no. 1-2, pp.44-67.

Lopes, N. (2009) “*Behaviour of stainless steel structures in case of fire*”. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.

Lopes, N.; Vila Real, P.M.M.; Simões da Silva, L.; Franssen, J.M. (2012). “*Numerical analysis of stainless steel beam-columns in case of fire*”. *Fire Safety Journal*. Vol 50, p.35-50.

Lopes, N.; Vila Real, P. M. M. (2013). “*Resistência ao fogo de colunas tubulares em aço inoxidável*”. Atas do IX Congresso de Construção Metálica e Mista, I Congresso Luso-Brasileiro de Construção Metálica Sustentável, Porto.

Ng, K.T.; Gardner, L. (2007). “*Buckling of stainless steel columns and beams in fire*”. Engineering Structures, vol 29(5), 717-730.

Palacios, L.(2005). “*Shear Design of Stainless Plate Girders*”. Universitat Politècnica de Catalunya. Dissertação de Doutoramento.

Pinto, A. (2010). “*Estabilidade local de perfis de aço enformados a frio*”. Tese de Mestrado, IST, Universidade Técnica de Lisboa.

Quiel S. E., Garlock M. E. M. (2010), “Calculating the buckling strength of steel plates exposed to fire”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 48, no. 9, pp. 584-695.

Ranby A. (1998), “Structural fire design of thin walled steel sections”, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 46, no. 1-3, pp. 303-304.

Sousa, R. (2015). “*Resistência ao fogo de colunas tubulares quadrangulares e circulares em aço inoxidável axialmente comprimidas*”, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.

Renaud C., Zhao B. (2006), “Investigation of simple calculation method in EN 1993-1-2 for buckling of hot rolled class 4 steel members exposed to fire”, in *Fourth International Workshop “Structures in Fire”*.

Simões da Silva, L.; Gervásio, H. (2007). “*Manual de dimensionamento de estruturas metálicas: métodos avançados: eurocódigo 3: projecto de estruturas de aço*”. CMM- Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.

Scifo A. (2013). “*Fire resistance of stainless steel hollow section columns*”. Tese de Mestrado, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées.

Talamona D., Franssen J.-M. (2005), “A Quadrangular Shell Finite Element for Concrete and Steel Structures Subjeted to Fire”, *Journal of Fire Protection Enginnring*, vol. 15, no. 4, pp. 237-264.

Vila Real, P.M.M. (2003). “*Incêndio em Estruturas Metálicas - Cálculo Estrutural*”. Amadora: Edições Orion